

Resum

L'objecte d'aquest treball és analitzar i proposar millores en la gestió energètica d'una planta de cogeneració de 3.720 kW elèctrics instal·lada en un fàbrica de producció de pinsos. Per abordar aquest projecte es pot diferenciar tres fases en les quals es divideix aquest document.

En una primera part es descriuen tots els elements interns que intervenen en l'operació de la planta. Inicialment s'explica les activitats que es realitzen a la planta a fi d'entendre les necessitats d'energia elèctrica i tèrmica. A partir de les dades enregistrades l'any 2016 s'analitzen els perfils de consum elèctrics dels diferents comptadors. També s'analitza com es distribueixen els consums tèrmics amb les dades mensuals recopilades l'any 2016. Per acabar aquesta primera part, s'analitza la informació disponible sobre l'equip de cogeneració.

Un cop amb un esquema intern de la planta, la següent fase aborda els aspectes externs que influeixen en la operació d'aquesta, que bàsicament serien els condicionants econòmics i legals. Es descriu les condicions de venda i compra d'electricitat, i es recopila informació sobre els preus de combustible, preus de l'energia elèctrica, taxes, etc.

En aquest punt, es defineix un problema d'optimització amb l'objectiu de comprovar si hi ha algun pla d'operació del motor de cogeneració i de contractació d'energia elèctrica més òptim que el que es va efectuar. Partint de tot el que s'havia analitzat prèviament es descriu la formulació del problema que s'implementa en un software amb capacitat d'optimització.

Els resultats del programa formulat ens indiquen que hi ha un estalvi potencial de 75.000€ respecte el pla d'operació que es va efectuar el 2016. D'aquest estalvi un 80% correspon a guanys per augmentar l'energia generada i un 20% a ajustar les potències contractades amb la companyia comercialitzadora. A més, es contemplen diferents escenaris com l'aplicació o no dels càrrecs per autoconsum derivats de l'anomenat impost al sol i la possibilitat de canviar l'horari de funcionament de la planta.

Atès que el potencial estalvi és significatiu es conclou que es convenient per l'empresa de la planta de cogeneració definir un nou pla d'operació de cara a futurs anys. Gràcies a la possibilitat d'actuar sobre consums desplaçables és possible definir un pla sense desviacions significatives. A més, es podria posar en pràctica propostes per tal de no comprometre l'eficiència i l'impacte ambiental de la planta amb el nou pla d'operació.

Sumari

RESUM	1
1. INTRODUCCIÓ	6
1.1. Origen i motivació del projecte	6
1.2. Objectius del projecte	6
1.3. Abast del projecte	6
2. DESCRIPCIÓ DE LA PLANTA	8
2.1. Ubicació	8
2.2. Activitats	8
2.2.1. Deshidratació de farratges	8
2.2.2. Mòlta de farratges	10
2.2.3. Producció de pastilles de farratge	10
2.2.4. Producció de pinsos compostos	10
2.3. Planta de cogeneració	12
2.4. Distribució interna	12
3. CONSUMS ELÈCTRICS	13
3.1. Comptadors de la planta	13
3.2. Anàlisi del consum mensual	15
3.3. Anàlisi consum diari	16
4. CONSUMS TÈRMICS	19
4.1. Esquema tèrmic	19
4.2. Anàlisi consums tèrmics	22
4.2.1. Aigua calenta a 85°C	22
4.2.2. Vapor	23
4.2.3. Gasos d'escapament	24
5. EQUIP DE COGENERACIÓ	26
5.1. Característiques tècniques	26
6. CONDICIONS ECONÒMIQUES	31
6.1. Aspectes generals dels mercats elèctrics	31
6.2. Compra electricitat	32
6.2.1. Conceptes de la factura	32
6.2.2. Períodes horaris	35
6.3. Venda electricitat	36
6.3.1. Ingressos venda electricitat	36

6.3.2.	Costos per la venda d'electricitat	41
6.4.	Autoconsum	42
6.5.	Compra GNL.....	43
7.	DEFINICIÓ DEL PROBLEMA D'OPTIMITZACIÓ	46
7.1.	Objectiu	46
7.2.	Consideracions prèvies.....	46
7.2.1.	Compra d'electricitat	46
7.2.2.	Consum de gas.....	47
7.2.3.	Tractament de dades	47
7.2.4.	Altres.....	47
8.	FORMULACIÓ	48
8.1.	Glossari de conjunts, paràmetres i variables	48
8.2.	Restriccions	52
8.2.1.	Límits de funcionament del motor	52
8.2.2.	Balanç energètic	52
8.2.3.	Retribució per la venda d'energia al mercat diari	52
8.2.4.	Retribució específica.....	53
8.2.5.	Costos per la venda d'energia a xarxa	53
8.2.6.	Cost de l'energia consumida de xarxa	53
8.2.7.	Contractació de potència elèctrica	53
8.2.8.	Pagaments ATR i capacitat.....	54
8.2.9.	Consum de combustible per la generació d'electricitat	54
8.2.10.	Cost GNL	54
8.2.11.	Peatges per autoconsum	54
8.2.12.	Rendiment Elèctric Equivalent	55
8.2.13.	Hores de funcionament.....	56
8.2.14.	Costos i retribucions total	56
8.3.	Funció objectiu	56
8.4.	Casos d'estudi programats	56
9.	RESULTATS	58
9.1.	Anàlisi resultats del cas real.....	58
9.2.	Anàlisi dels resultats entre la optimització i cas real (sense autoconsum) ..	59
9.2.1.	Potència contractada	59
9.2.2.	Costos i ingressos.....	60
9.2.3.	Rendiment Elèctric Equivalent	61
9.3.	Anàlisi de l'aplicació del peatges per autoconsum.....	63
9.4.	Anàlisi de la modificació de l'horari de funcionament	64

10. PRESSUPOST	66
11. IMPACTE AMBIENTAL	67
CONCLUSIONS	70
AGRAÏMENTS	72
BIBLIOGRAFIA	73
Referències bibliogràfiques.....	73
Bibliografia complementària.....	73

1. Introducció

1.1. Origen i motivació del projecte

La idea del projecte sorgeix després d'haver treballat durant varis estius a Corporación Alimentaria Guissona, S.A. i conèixer el potencial d'estudi dins d'aquesta empresa. Segons el manifestat per alguns treballadors, no s'havia analitzat amb suficient detall l'operació en matèria energètica de la fàbrica de Bujaraloz (província de Saragossa). L'oportunitat de poder basar aquest projecte en un cas real i amb dades reals era una important font de motivació per al desenvolupament de l'estudi que es presenta en aquest document.

1.2. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és aportar millores en la gestió energètica de la fàbrica de pinsos de Bujaraloz on hi ha instal·lada una cogeneració de 3.720 kW elèctrics. Amb les dades de l'any 2016 com a referència, es vol trobar quin pla d'operació del motor de la cogeneració i quina contractació d'energia seria òptima per l'any 2016. D'aquesta manera es pot quantificar la millora entre l'òptim i les dades d'operació reals del 2016.

Amb aquesta finalitat, inicialment es defineixen els objectius específics de conèixer i analitzar els consums de la fàbrica, tant elèctrics com tèrmics, i buscar els aspectes econòmics i legals que afecten a la planta de cogeneració.

1.3. Abast del projecte

Per una banda el projecte està limitat a tota la informació rebuda per part de l'empresa.

Pel que fa a dades de consums elèctrics, mitjançant l'accés al *software* de gestió energètica "PowerStudio" s'ha pogut extreure totes les dades necessàries enregistrades pels comptadors. En relació als consums tèrmics, s'ha tingut accés als informes mensuals on es recullen les lectures manuals dels comptadors.

A part de les dades energètiques, s'ha tingut accés a informació relacionada al funcionament de la planta, als esquemes unifilars i algun projecte trobat en els arxius de l'empresa.

Pel que fa als detalls de les factures elèctriques i de gas, s'ha tingut un accés limitat per motius de confidencialitat. Únicament s'ha pogut visualitzar algunes factures de mostra.

A banda de tota la informació aportada per la empresa, el projecte inclou tot allò que sigui necessari a l'hora de dissenyar un model d'optimització que sigui suficient per extreure conclusions adequades. Per exemple, normativa d'aplicació al cas d'estudi i informació de la normativa referent al cas d'estudi.

Tota informació complementaria sobre normativa o aspectes tècnics que es desviï de l'objectiu del projecte queda fora de l'abast del projecte. Per exemple, informació sobre l'aplicació de la normativa a altres instal·lacions de naturalesa diferent, càlculs que no formin part de la formulació del problema, o bé, càlculs que es puguin desestimar sempre que es justifiqui que no afecta als resultats del problema. Les variacions del preu del gas i la modelització del mercat del gas tampoc es consideren en aquest d'estudi.

consisteix en reduir la humitat dels farratges del 35-40% en origen al 12%.



Figura 2.2. Munt de farratges abans de la deshidratació.

Per tal de deshidratar els farratges s'utilitza gasos de combustió que s'apliquen directament en un extrem d'un tambor giratori anomenat Tromel. En l'altra banda del Tromel hi ha un ventilador que extreu el farratge deshidratat. Seguidament es refreda i es compacta en forma de bales. Aquestes bales s'emmagatzemen i es poden destinar o bé a la venda directa o a la producció de pinsos compostos convencionals, pastilles i unifeed.



Figura 2.3. Sortida de la màquina embaladora.

La temporada d'alfals es mou des de mitjans d'abril fins a mitjans de novembre. Per la qual cosa la planta de deshidratació únicament treballa durant aquest període. Excepte en alguns dies dels mesos de major recol·lecció d'alfals (juny, juliol), la deshidratadora no es troba en

funcionament tot el dia i es pot planificar la seva operació.

2.2.2. Mòlta de farratges

Per a la producció pastilles i alguns tipus de pinsos compostos convencionals, s'utilitzen les bales de farratge emmagatzematges. Aquestes han de passar per un procés de mòlta per tal d'adequar la mida del farratge. El farratge molturat es pot emmagatzemar en sitges previ a la fabricació dels diferents productes i, atès que no és un procés que treballi tot el dia, hi ha possibilitat de programar aquesta activitat en el moment del dia que sigui més convenient.

2.2.3. Producció de pastilles de farratge

Les pastilles són un tipus de pinso que es compon únicament de farratge. En el procés de fabricació d'aquest producte es compacta el farratge mitjançant una empastilladora fins a obtenir un producte com el que es mostra en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Pastilles de farratge [1].

Després de la deshidratació de farratges, la planta de Bujaraloz va ampliar el seu camp d'operació amb la producció de pastilles. No obstant, avui en dia, no és un producte amb molta demanda i la empastilladora només treballa per petites comandes alguns dies i durant unes poques hores. Per tant, igual que la mòlta, és un activitat que es pot desplaçar al llarg del dia per tal de produir en el moment més idoni.

2.2.4. Producció de pinsos compostos

El pinso és una mescla de cereals i altres elements per a l'alimentació dels animals. Dependent de l'espècie animal i la seva funció es realitzen diferents barreges. D'aquesta manera, els pinsos, en funció de la seva composició, poden servir per a l'engreix, per a potenciar la posta, per facilitar el creixement, etc.

La barreja de matèries primeres de què es compona el pinso es compacta en forma de pellets o grànuls per aconseguir un major rendiment en la ingesta del pinso. Per arribar a

obtenir els pellets, el primer pas consisteix en aconseguir una farina de les matèries primeres barrejades. Aquesta farina es condiciona amb vapor, seguidament una màquina granuladora dóna la forma desitjada (de petits cilindres) per obtenir els pellets, aquests es refreden i finalment s'emmagatzema el producte.



Figura 2.5. Exemple on s'aprecia els pellets de pinso.

A la planta de Bujaraloz hi ha 4 línies de producció de pinso en funció de la subfamília animal a la que vagin dirigits.

- Línia 1. Porcí.
- Línia 2. Conills i vedells. (pinso que utilitza farratges).
- Línia 3. Aus (pollastres).
- Línia 4. Unifeed. És un tipus de pinso que utilitza farratges sense procés de condicionament amb vapor i granulació. Veure exemple de la Figura 2.6.



Figura 2.6. Unifeed.

D'aquestes línies cal considerar que la 1 i 4 no poden funcionar en paral·lel. En quant a funcionament general, les diferents línies operen en funció de les comandes de pinso que

arriben.

2.3. Planta de cogeneració

Amb l'augment de producció anual pel conjunt d'activitats que s'han anat sumant a la planta de Bujaraloz, la capacitat de la xarxa elèctrica no era suficient per abastir el consum elèctric de la fàbrica i tenint en compte les demandes tèrmiques que s'han exposat (vapor i gasos), l'any 2000 es va instal·lar una cogeneració amb fuel-oil amb capacitat per suplir tota la demanda actual de la fàbrica.

Degut a un augment dels preus del fuel-oil, l'any 2010 es va instal·lar una cogeneració de gas amb la mateixa capacitat. Atès que no hi ha gasoductes amb suficient capacitat que arribin a la planta, aquesta s'abasteix amb gas natural liquat (GNL) transportat per camions.

La instal·lació no està dissenyada perquè ambdues cogeneracions puguin funcionar en paral·lel.

2.4. Distribució interna

La planta de Bujaraloz és un complex que es compon de diferents edificis per realitzar les diferents activitats descrites, per la cogeneració, per les necessitats d'emmagatzematge i per altres serveis. En la següent figura es pot apreciar la distribució dels diferents edificis.

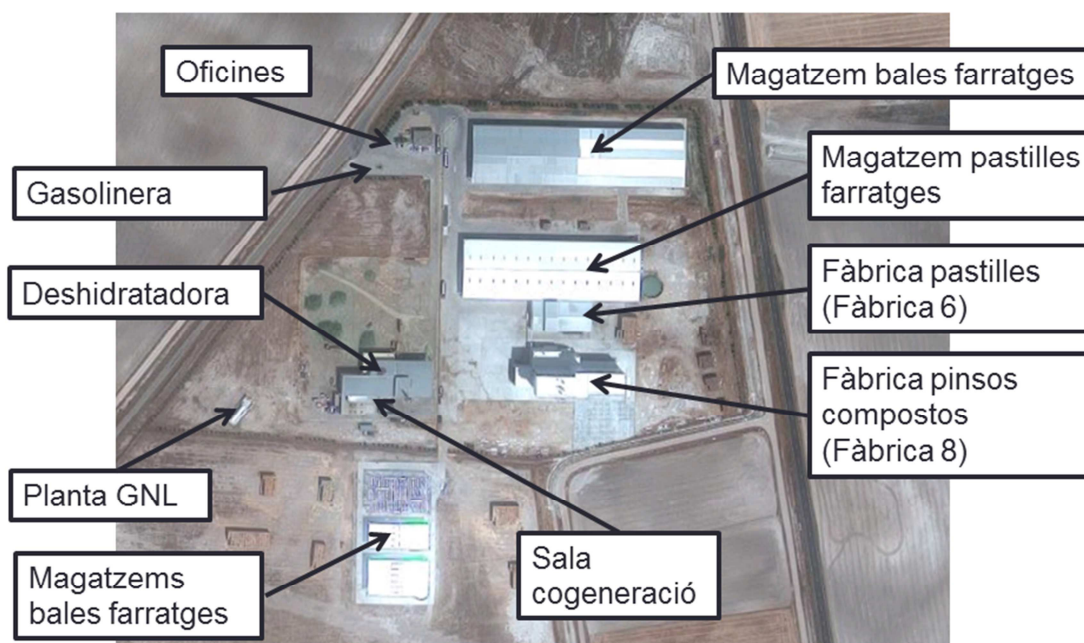


Figura 2.7. Plànol de les diferents zones que comprenen la planta de Bujaraloz.

3. Consums elèctrics

En aquesta secció s'analitzen els consums elèctrics de la fàbrica de Bujaraloz. En primer lloc es presenten els esquemes de comptadors per tal de veure d'on s'ha extret la informació que a continuació s'analitza.

3.1. Comptadors de la planta

La planta de Bujaraloz consta de dos grups de generació que no poden funcionar en paral·lel. Aquestes cogeneracions poden exportar a la xarxa l'excedent d'energia que no es consumeixi internament.

La connexió a la xarxa es realitza a 25 kV, així com la distribució interna entre els diferents transformadors de consum i generació.

En les figures 3.1 i 3.2 es mostren els esquemes unifilars de la xarxa de comptadors per tal de comprendre les dades energètiques que es presenten en apartats posteriors.

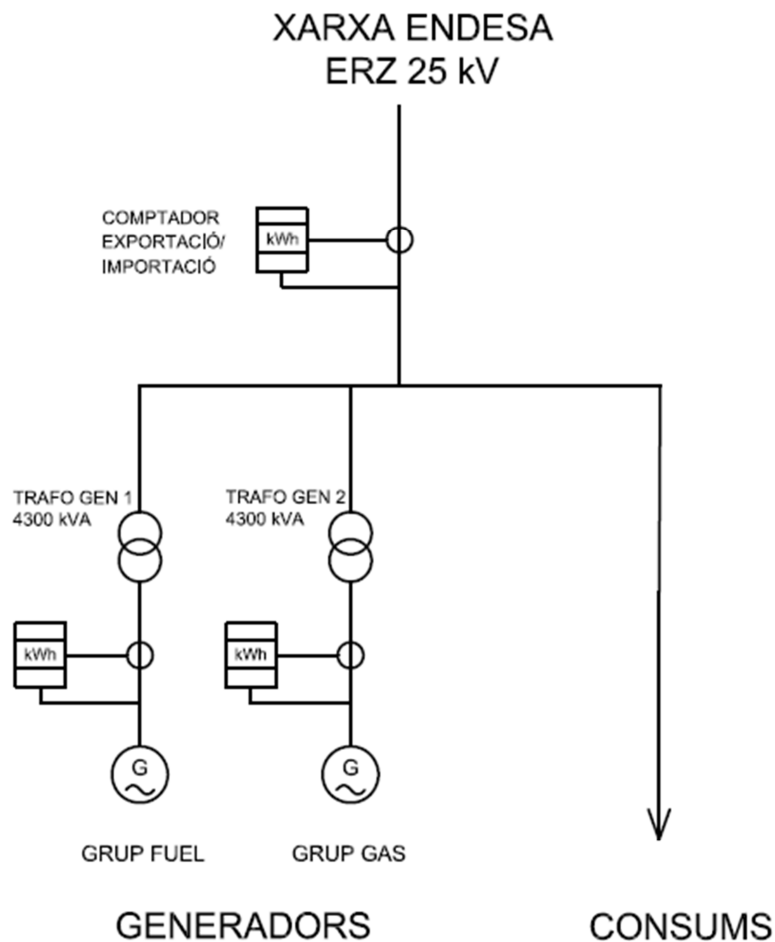


Figura 3.1. Esquema connexió xarxa, generadors i consums. Font: Pròpia.

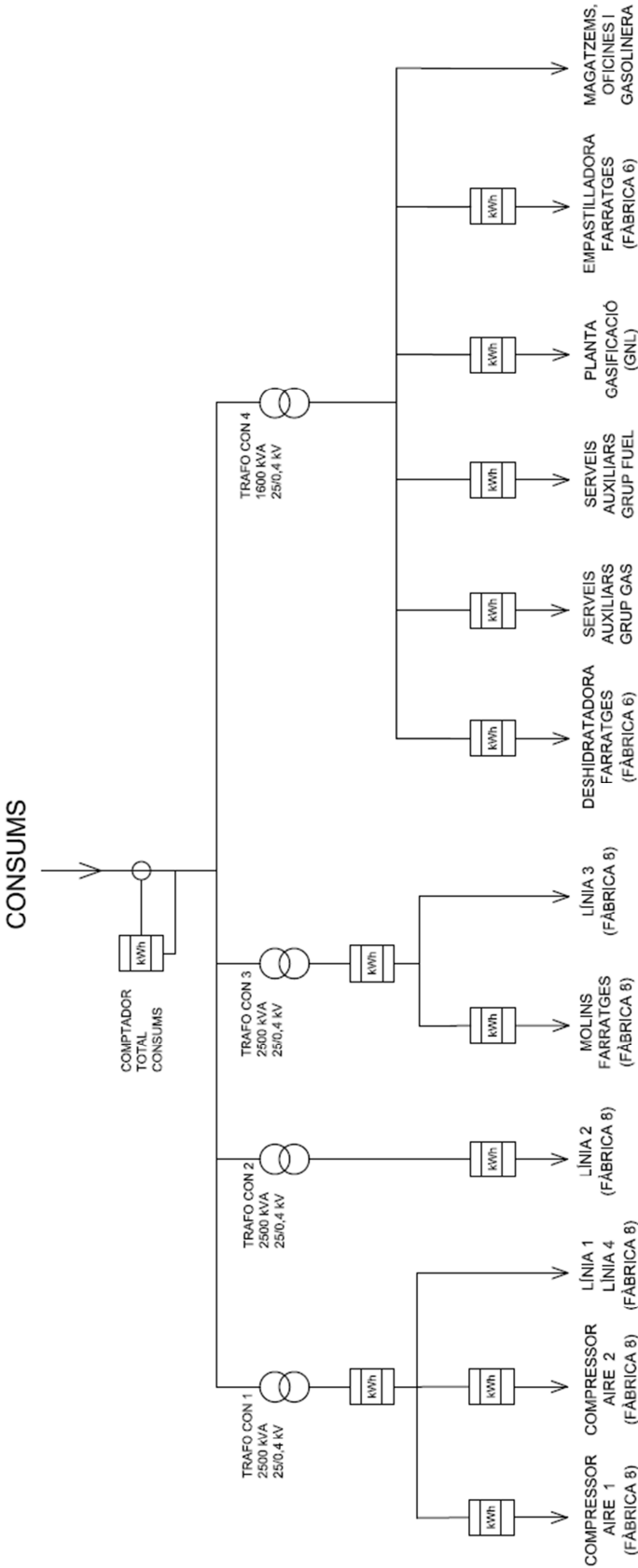


Figura 3.2. Esquema comptadors dels consums. Font: Pròpia.

3.2. Anàlisi del consum mensual

Mitjançant el *software* "Powerstudio" es pot tenir accés remot a totes les dades enregistrades pels comptadors. Atès que es va tenir accés a un ordinador de la companyia, s'han pogut utilitzar totes les dades existents sobre la planta de Bujaraloz per tal d'executar un anàlisi complet.

Com a partida de l'anàlisi energètic es pren l'any 2016 ja que es disposa de dades completes de l'any i són força fiables.

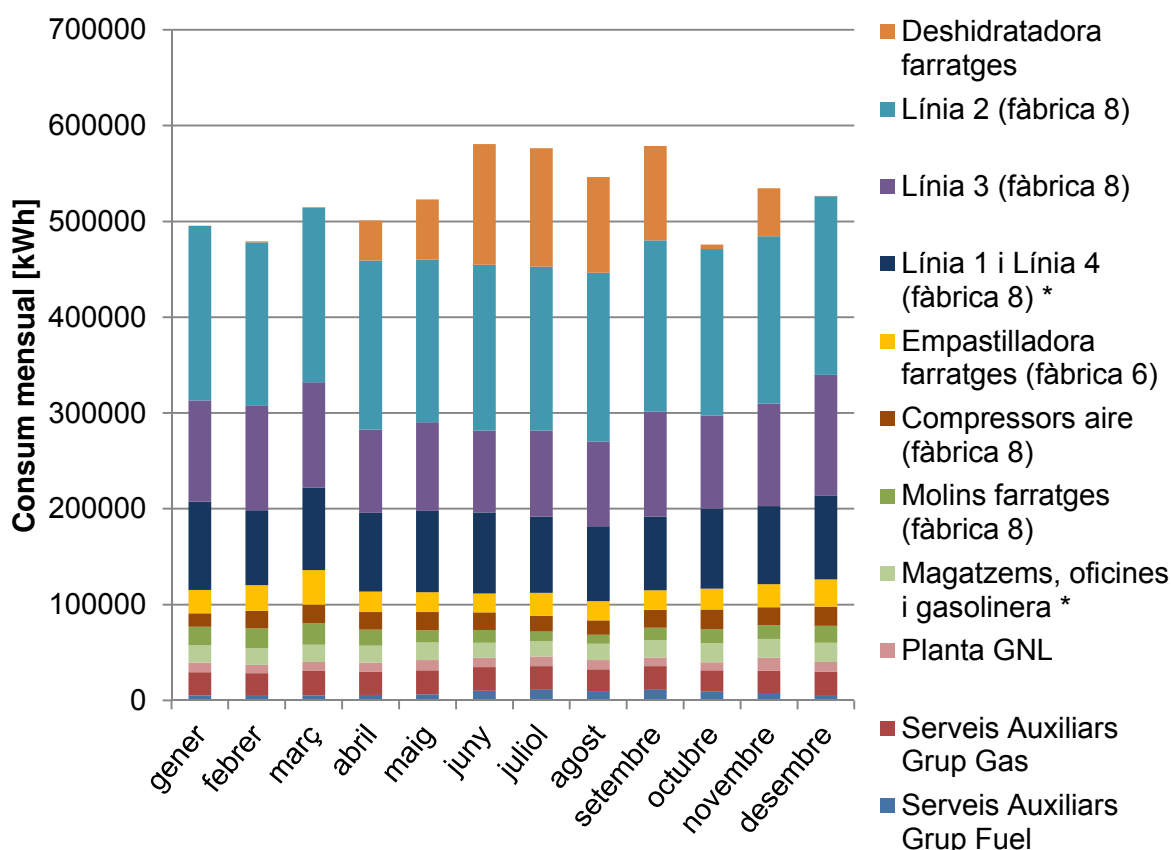


Figura 3.3. Consum agregat mensual de l'any 2016 dels diferents comptadors.

*El consum de magatzems, oficines i gasolinera, així com el de la línia 1 més la línia 4 s'ha calculat a partir resta entre el comptador general que els hi correspon i la suma dels altres comptadors locals.

En la Figura 3.3 s'observen diferents grups de consums que es classifiquen a continuació:

- Deshidratadora: consum significatiu que es localitza d'abril a novembre i que presenta un major consum en els mesos d'estiu.
- Línies de producció: les línies de producció representen el major consum de la planta. Entre el 58 i el 76% del consum correspon a aquest grup.

- Consums desplaçables: empastilladora i els molins de farratges. Depenent de l'època de l'any, és a dir, si funciona la deshidratadora o no, el pes dels consums desplaçables varia del 6 al 12%.
- Altres consums: planta GNL, serveis auxiliars grups de cogeneració, compressors, magatzems, oficines i gasolinera. Tot aquest grup constitueix, aproximadament, un 15% del consum.

3.3. Anàlisi consum diari

Es consideren dos casos d'anàlisi: el perfil de consum a l'estiu amb la deshidratadora en funcionament i el perfil de consum a l'hivern sense la demanda elèctrica de la deshidratadora.

En primer lloc a la Figura 3.4 es representa el perfil de consum en una setmana de juny. D'aquesta manera es pot veure com les corbes de consum quan la fàbrica està en funcionament (de 6h a 22h) són molt variables ja que depenen de les comandes que van arribant. S'observa que s'arriba a pics de consum entre 2.500 i 3.000 kWh, pel que hi ha un cert marge pel motor de cogeneració que pot arribar a uns 3.700 kWh en moments puntuals. Respecte els mesos d'hivern (Figura 3.6), on no s'arriba als 2.000 kWh de punta, influeix significativament la manca de consum elèctric de la deshidratadora. Les diferents puntes i valls en el consum apareixen en funció de si s'atura o s'engega alguna de les línies, i de la càrrega en què operen.

La deshidratadora presenta un consum força constant quan entra en operació, al voltant dels 400 kWh. Normalment funciona part del dia, tot i que, en el mesos d'estiu pot haver dies que funcioni pràcticament durant tot l'horari en què opera la fàbrica.

Tant a l'estiu (Figura 3.5) com a l'hivern (Figura 3.7), la línia 2, destinada a la producció de pinsos a conills i vedells, és la que presenta un major consum. De fet, es pot observar com el perfil de consum de la línia 2 s'assembla força a la corba del consum total.

En moment puntuals, pot arribar una comanda de pinso que obliga a treballar a les nits. En les gràfiques del mes de desembre es pot constatar aquest fet i implica que el consum total del mes augmenti (vegi's en la Figura 3.3 el consum total del desembre). També es pot donar el cas que la fàbrica treballi durant algunes hores del matí de dissabte per realitzar càrregues de camions, principalment. Per això, en cas que hi hagi consum el dissabte, aquest no supera els 800 kWh punta. Els diumenges i festius la fàbrica roman tancada i hi ha un consum base igual que a les nits.

El consum base de les nits, dissabtes, diumenges i festius es situa entre els 150 i 200 kWh bàsicament degut al consums del grup d'altres definit en l'apartat 3.2. Gran part del consum base correspon als serveis auxiliars de la cogeneració.

Pel que fa als molins i la empastilladora (càrregues desplaçables), tenen un cert impacte en

la corba de consum total. Si aquestes màquines s'engeguen quan totes les línies estan en funcionament, s'observa un pic més gran en el consum diari i pel contrari, si s'engeguen quan les línies funcionen a càrrega parcial o estan parades, ajuden a suavitzar la corba de consum del dia. Pels dies representats, la empastilladora no entra en funcionament, però presenta un petit consum base.

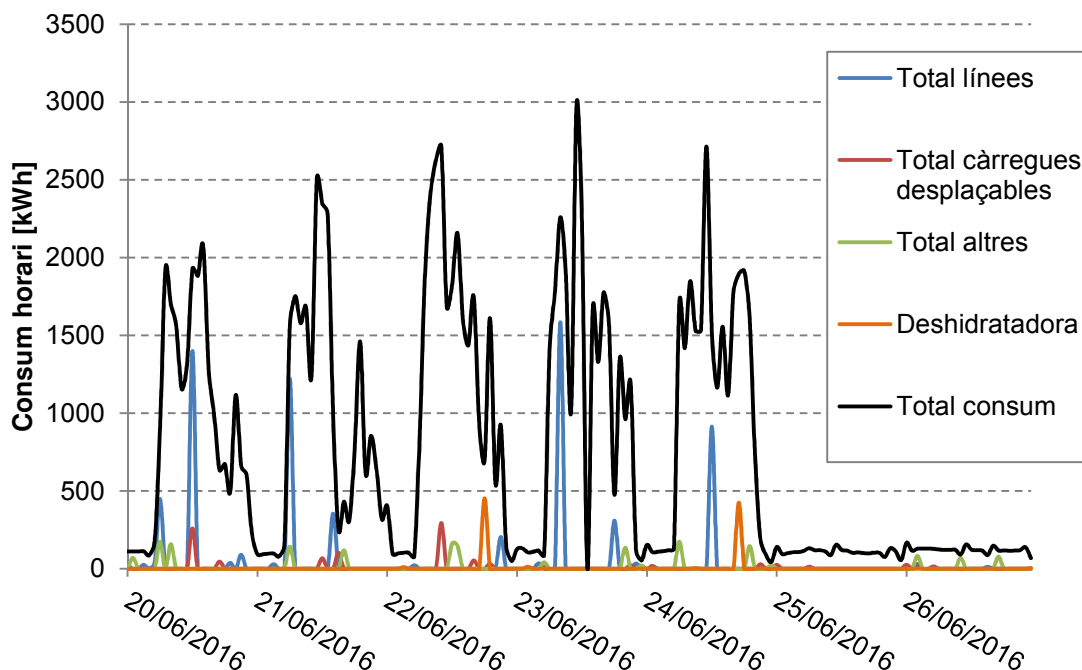


Figura 3.4. Distribució de consums en una setmana de juny de 2016.

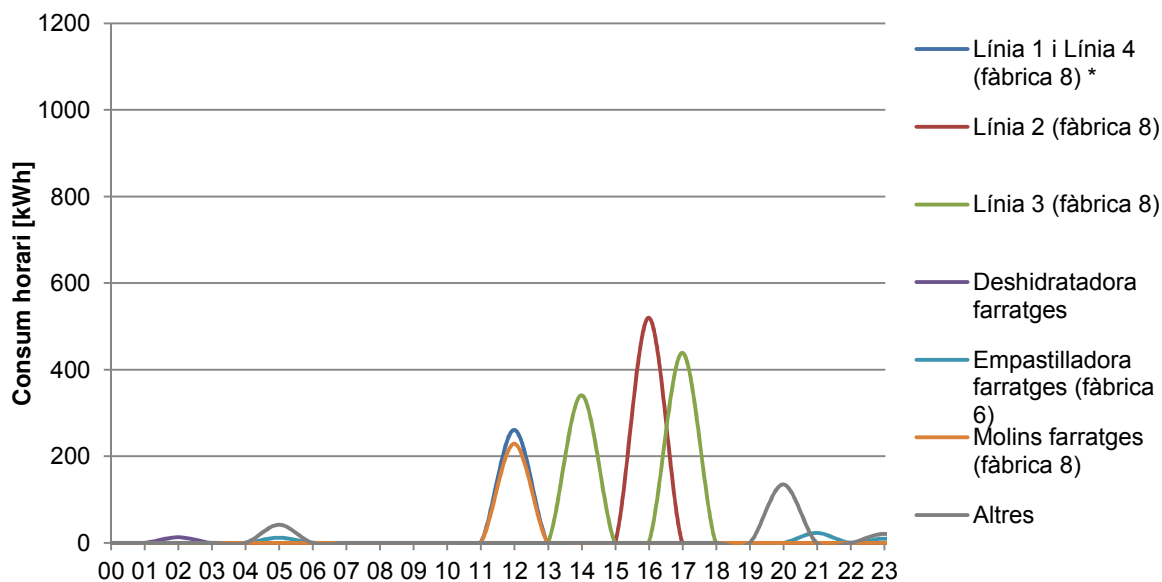


Figura 3.5. Distribució de consums pel dia 23 de juny de 2016.

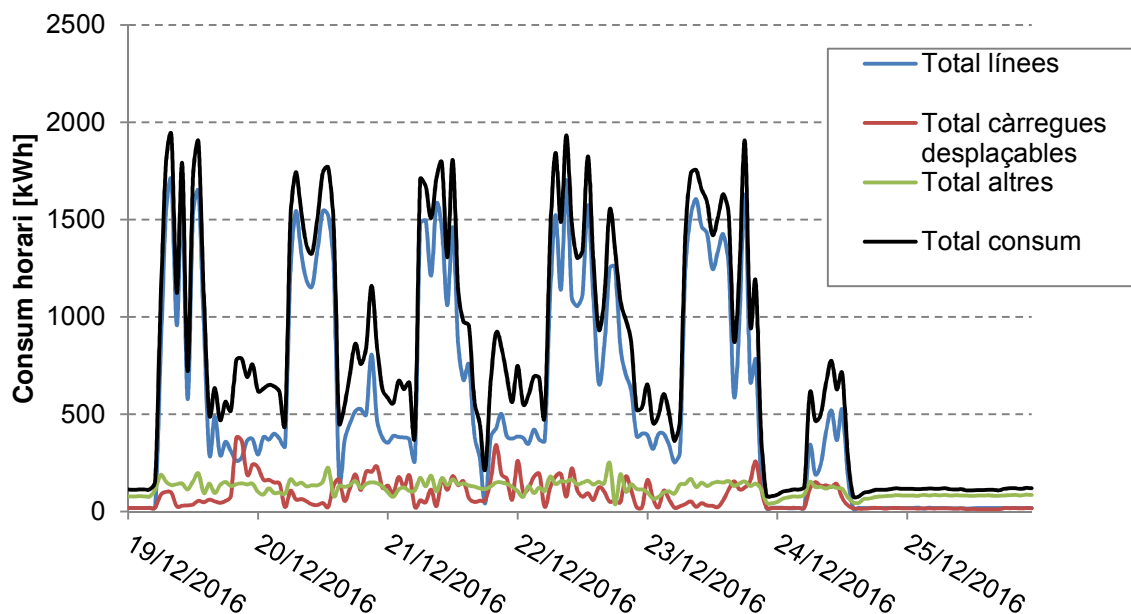


Figura 3.6. Distribució consums en una setmana de desembre de 2016.

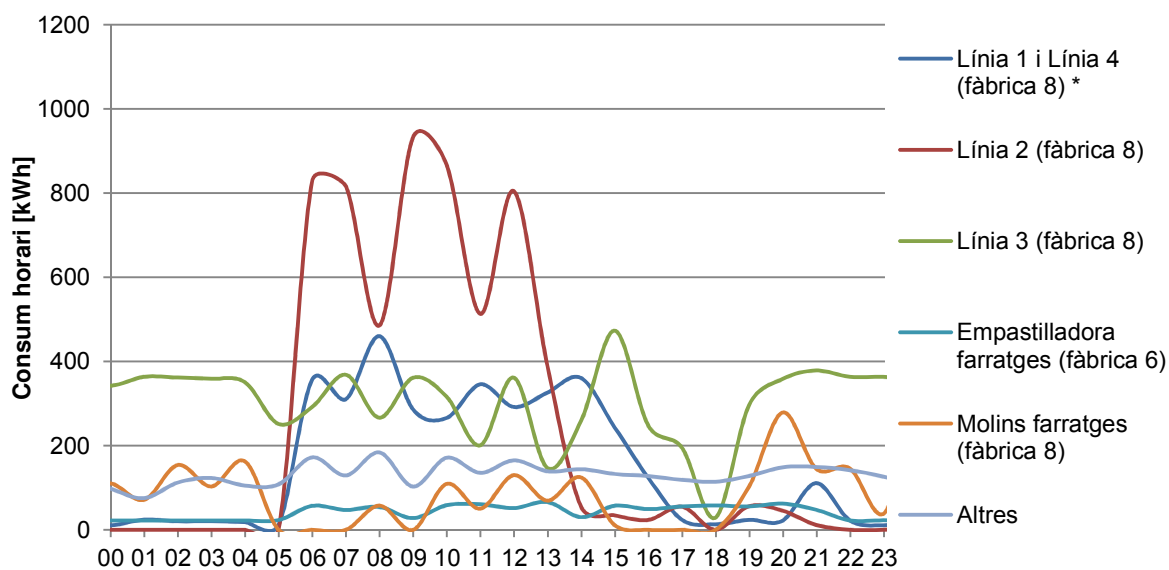


Figura 3.7. Distribució de consums pel dia 21 de desembre de 2016.

4. Consums tèrmics

En aquesta secció es presenta l'esquema de consums tèrmics de la planta de Bujaraloz i s'analitzen aquests consums.

4.1. Esquema tèrmic

Els motors de cogeneració transformen l'energia química del combustible a energia tèrmica i aquesta es troba en els següents casos enumerats.

1. Gasos d'escapament de la combustió
2. Oli del circuit lubricant
3. Aigua de la refrigeració de les camises
4. Intercooler
5. Radiació

L'intercooler és un bescanviador que s'encarrega de refredar l'aire comprimit pel turbocompressor del motor. Aquest bescanviador intercanvia calor de l'aire comprimit a aigua amb anticongelant (aigua glicolada). L'aire comprimit es refreda de 42,4 a 38°C, mentre que l'aigua s'escalfa de 33 a 37,4°C aproximadament. Tenint en compte la baixa temperatura a la que s'ha de refredar l'aigua, s'utilitza una torre de refrigeració i no és realitza cap aprofitament tèrmic. Tota la calor dissipada a la torre de refrigeració es considera com a pèrdues que es sumen a les pèrdues per radiació del motor. Les característiques de la torre de refrigeració es troben recollides a la Taula 4.1.

Taula 4.1. Característiques dels dissipadors tèrmics de baixa temperatura (torres de refrigeració).

Dades generals	
Tipus	Aigua/Aire (Evaporativo)
Fluid a refrigerar	Aigua amb anticongelant
Cabal a refrigerar	65 m ³ /h
Temperatura d'entrada	37,4 °C
Temperatura de sortida	33 °C
Potència a dissipar	332,55 kW
Capacitat de l'equip	500 kW
Temperatura aire exterior	45 °C

Pel que fa al circuit de les camises, l'aigua de refrigeració s'ha de refredar de 90 a 78°C. El circuit de l'oli lubricant també s'ha de refredar en un rang de temperatures semblant (de 83,6 a 80°C). Ambdós circuits es refrigeren amb aigua amb glicol en dos etapes de bescanvi en sèrie. L'aigua s'escalfa a una alta temperatura (85°C aproximadament) i es pot utilitzar per

diferents aprofitaments tèrmics o finalment, en última instància, se'n dissipa la calor excedentària en aerotermos amb les característiques tècniques indicades a la Taula 4.2. La calor dissipada en els aerotermos es suma a la resta de pèrdues.

Taula 4.2. *Característiques dels dissipadors tèrmics d'alta temperatura (aerotermos).*

Dades generals	
Marca	ALFA DUVAL
Tipus unitat	PFC Aigua/Aire (No evaporatiu)
Model	1xPFC6/4/6-T
Capacitat necessaria	1821 kW
Marge	9%
Capacitat calculada	1.985,37 kW
Dades tèrmiques	
Temperatura del aire In/Out	40/75,1°C
Fluid	Glicol de etilè 20% (kg/kg)
Temperatura del fluid In/Out	92/68,1°C
Cabal del fluid	75 m³/h
Pèrdua de càrrega del fluid	37,6 kPa
Punt de congelació	-10,27°C

Finalment com a resultat de la combustió s'alliberen gasos de combustió entre 505 i 480°C que, o bé es poden aprofitar directament per la deshidratació de farratges o bé es poden utilitzar per generar vapor en una caldera destinada als gasos de la cogeneració.

En resum, bàsicament es tenen els següents fluids per aprofitament tèrmic:

1. Aigua calenta a 85°C
2. Gasos d'escapament
3. Vapor

El vapor també es pot produir, amb la combustió del gas o fuel-oil, en un caldera independent a la que s'utilitza per l'aprofitament dels gasos d'escapament. De la mateixa manera, per deshidratar alfals també es pot utilitzar un cremador addicional per generar més gasos a partir de gas o fuel-oil.

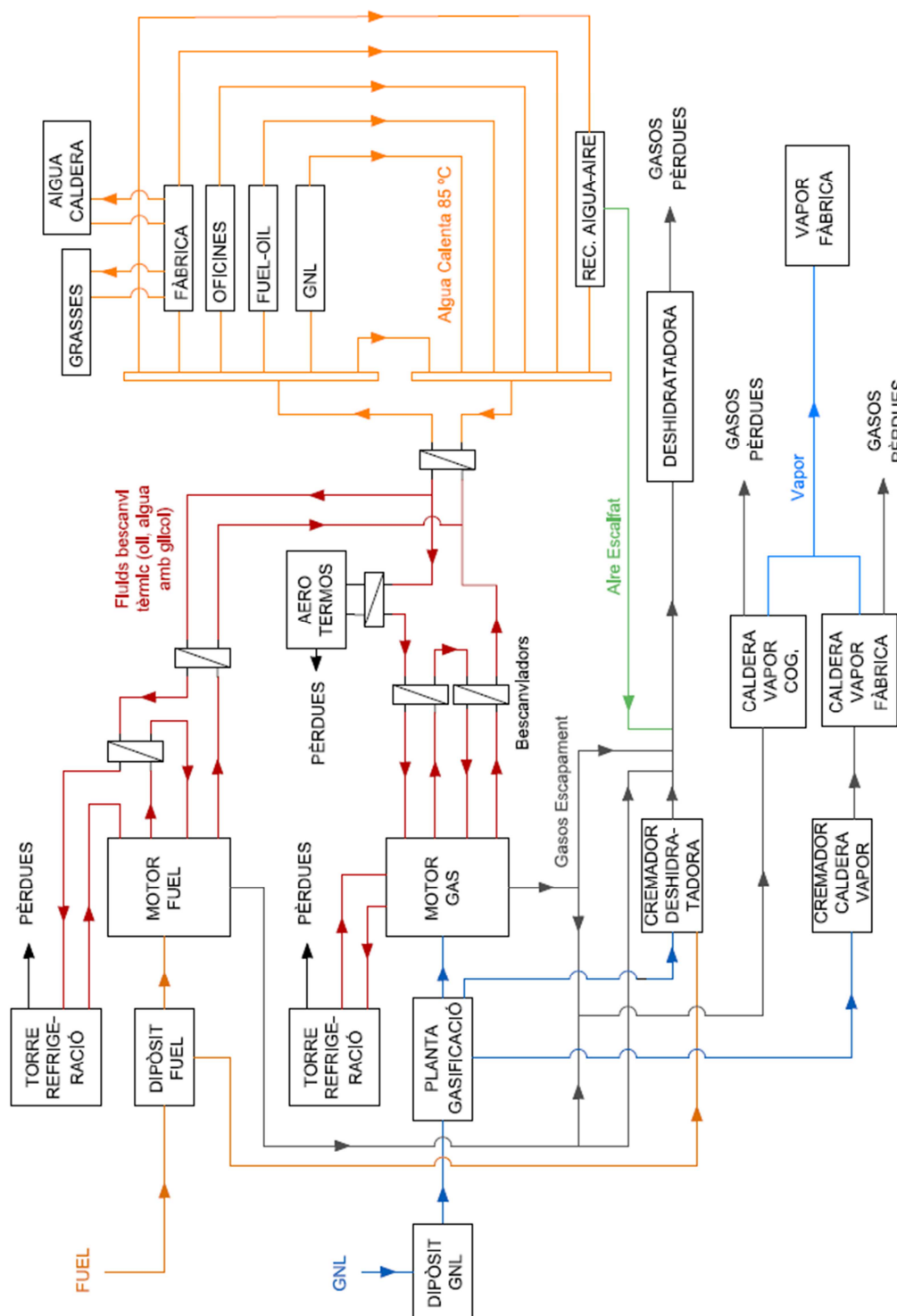


Figura 4.1. Esquema dels fluxos tèrmics. Font: Pròpia

4.2. Anàlisi consums tèrmics

4.2.1. Aigua calenta a 85°C

De l'aigua calenta a 85 °C se'n realitza els següents aprofitament tèrmics:

1. Terra radiant de les oficines durant els mesos freds.
2. Escalfament de grasses.
3. Preescalfar l'aigua d'entrada a les caldera.
4. Escalfament del fuel-oil per reduir-ne la viscositat (en cas que s'utilitzés com a combustible).
5. Vaporització del GNL.
6. Escalfar aire per a la deshidratadora d'alfals.

Únicament es té dades mensual de tota l'energia aprofitada de l'aigua calenta a 85°C. Per saber, punt a punt, quanta energia s'aprofita a la Taula 4.3 es recull la informació trobada en un projecte que pot servir com a estimació. Considerar la utilització de l'Eq. 4.1.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Taula 4.3. Dades projecte sobre l'aprofitament de l'aigua a 85°C.

c_p gasos-aire	0,24	kcal/kg·°C
c_p aigua	1	kcal/kg·°C
Recuperador aire-aigua deshidratadora		
T₁ aire	63	°C
T₂ aire	15	°C
m_{aire}	60.000	kg/h
Q_{aprofitada}	803,7	kW
Hores funcionament	1515	h
Aigua calderes vapor		
T₁ aigua	75	°C
T₂ aigua	15	°C
m_{aigua}	7.000	kg/h
Q_{aprofitada}	488,4	kW
Hores funcionament	2.485	h
Línia de grasses		
Q_{aprofitada}	349	kW
Hores funcionament	4.000	h
Terra radiant oficines		
Q_{aprofitada}	47	kW
Hores funcionament	2.000	h

A la Taula 4.4 es recull les dades d'aprofitament d'energia de l'aigua calenta a 85 °C per cada mes de l'any 2016. Aquestes dades s'han extret dels informes mensuals on s'indiquen les lectures dels comptadors d'energia.

Taula 4.4. Aprofitament mensual d'energia de l'aigua calenta a 85°C l'any 2016.

	Aigua calenta [kWh]
Gener	157.214
Febrer	168.057
Març	182.900
Abril	179.418
Maig	183.069
Juny	222.725
Juliol	218.321
Agost	213.994
Setembre	260.810
Octubre	248.679
Novembre	249.958
Desembre	186.062
Total	2.471.207

4.2.2. Vapor

Per conèixer el consum de vapor es té, per una banda, les dades mensuals de producció de vapor de la caldera de la cogeneració i per una altra banda, es té una estimació mensual del consum de gas de la caldera de vapor de la fàbrica. A partir del consum de gas també es pot estimar el consum total de vapor mensual. A la Taula 4.5 es recull la informació.

Taula 4.5. Consums mensuals de vapor de l'any 2016.

	Consum gas caldera vapor fàbrica [kWh]	Vapor caldera cogeneració [kWh]	Total consum vapor [kWh]
Gener	225.919	240.712	444.039
Febrer	99.499	360.557	450.106
Març	84.128	377.396	453.111
Abril	331.612	221.542	519.992
Maig	179.002	220.341	381.443
Juny	257.252	144.222	375.748
Juliol	207.256	228.073	414.603
Agost	196.040	234.875	411.311
Setembre	167.661	238.678	389.573
Octubre	108.522	353.311	450.981
Novembre	178.772	274.230	435.124
Desembre	104.722	383.999	478.248
Total	2.140.385	3.277.933	5.204.280

Cal considerar que de vegades la caldera de la fàbrica i la de cogeneració funcionen en paral·lel ja que la cogeneració no és suficient per abastir tota la fàbrica.

4.2.3. Gasos d'escapament

Finalment per saber l'aprofitament directe dels gasos d'escapament també es disposa de dades mensuals dels gasos aprofitats del motor i del consum de gas del cremador de la deshidratadora. Ja que tot l'aprofitament directe de gasos es realitza a la deshidratadora, a partir de les dades esmentades s'ha pogut estimar quin és el consum total mensual d'aprofitament directe de gasos de combustió. S'observa a la Taula 4.6 que els gasos d'escapament produïts pel motor no són suficients per abastir el consum de la deshidratadora ja que el consum del cremador és habitualment del doble que de l'energia aprofitada del motor.

També es té dades del consum elèctric de la deshidratadora, horari i mensual. Tenint en compte això, s'ha comprovat si el consum mensual elèctric de la deshidratadora i el consum de gasos està relacionat.

Taula 4.6. Dades de consum de la deshidratadora.

	Gasos escapament aprofitats [kWh]	Consum cremador deshidratadora [kWh]	Total consum gasos deshidratadora[kWh]	Consum elèctric deshidratadora [kWh]
Gener	0	0	0	395
Febrer	0	0	0	807
Març	700	0	700	698
Abril	123.800	243.387	342.848	41.678
Maig	199.900	400.225	560.103	62.700
Juny	381.900	567.335	892.502	126.107
Juliol	297.500	575.110	815.099	123.621
Agost	248.600	503.965	702.169	99.970
Setembre	311.500	461.841	727.157	98.496
Octubre	21.700	22.496	41.946	4.578
Novembre	128.000	337.165	431.449	50.135
Desembre	0	0	0	130
Total	1.713.600	3.111.524	4.513.972	609.314

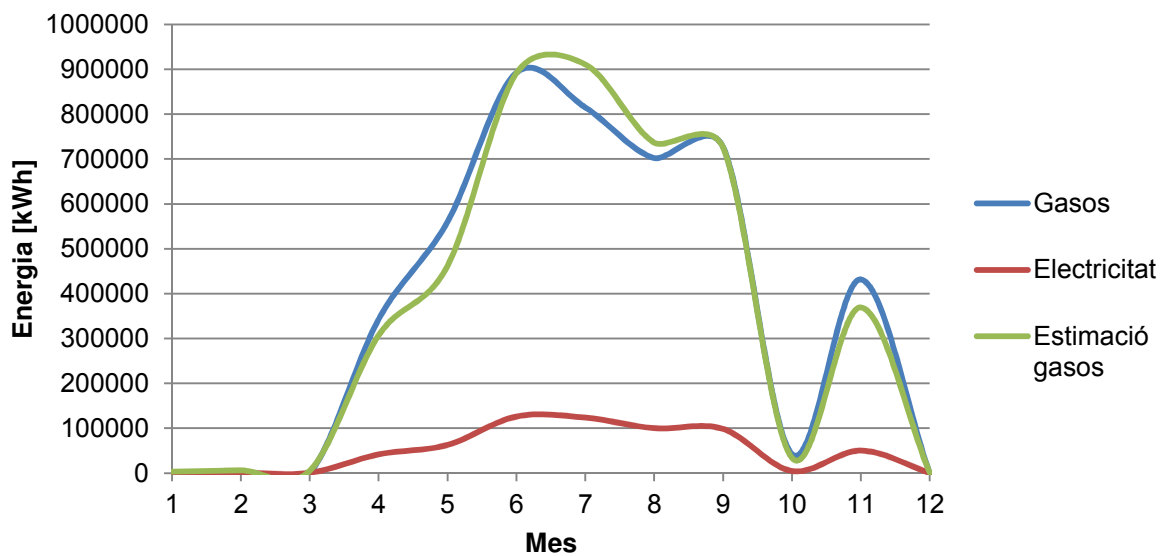


Figura 4.2. Estimació del consum de gasos per la deshidratadora a partir del consum elèctric (any 2016).

S'observa a la Figura 4.2 que s'aconsegueix una estimació prou bona, amb un error absolut del 7,47%. Aquesta estimació es pot extrapolar per conèixer el consum horari de gasos segons l'Eq. 4.2.

$$H_t^{desh} = 7,368 \cdot E_t^{desh} - 1,032 \cdot 10^{-5} \cdot (E_t^{desh})^2 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

On:

H_t^{desh} : Consum de gasos horari en kWh.

E_t^{desh} : Consum elèctric horari de la deshidratadora en kWh.

Els resultats de l'Eq. 4.2 serviran com a dades pel problema d'optimització.

Del consum de gasos de la deshidratadora es pot concloure que no són suficients els gasos produïts per la cogeneració ja que el consum del cremador de la deshidratadora és de l'ordre del doble que l'aprofitament de gasos. També s'ha de tenir en compte que els gasos de la combustió del motor de cogeneració estan a aproximadament la mateixa temperatura que els gasos del cremador.

5. Equip de cogeneració

Prèviament s'ha esmentat que hi ha instal·lats dos motors de cogeneració, un de fuel-oil i un altre de gas, però ambdós no poden funcionar en paral·lel.

En el context actual únicament s'utilitza el motor de gas degut a que es més beneficiós econòmicament, així com també, pel motiu que la utilització de gas com a combustible és més respectuosa amb el medi ambient. La relació d'emissions de diòxid de carboni per la combustió del fuel-oil és significativament major a la del gas, pel que, tenint en compte les tendències actuals de control d'emissions, el fuel-oil va quedant apartat a un segon pla.

El motor de fuel-oil continua en operació, engegant-se únicament per tasques de manteniment. No obstant, davant d'una hipotètica pujada del preu del gas, podria tornar a considerar-se la seva utilització normal.

Tenint en compte l'exposat, en aquest treball es considera que solament s'utilitza el motor de gas. A més, degut a la seva data d'instal·lació més actual (2010) ha estat possible aconseguir informació sobre el motor en els arxius de l'empresa, mentre que pel motor de fuel-oil (amb data d'instal·lació l'any 2000) no ha estat possible.

5.1. Característiques tècniques

Les dades de construcció del motor de cogeneració de gas són les que es recullen a la Taula 5.1.

Taula 5.1. *Característiques de construcció del motor.*

Dades motor	
Marca	DEUTZ POWER SYSTEMS
Tipus	TCV2032V16
Cicle de treball	Otto, quatre temps
Combustible	Gas natural (número de metà ≥ 70)
Diàmetre de cilindres	260 mm
Carrera pistó	320 mm
Velocitat de gir	1.000 min ⁻¹
Cilindrada unitària	17 L
Cilindrada total	272 L
Relació de compressió	12
Pressió mitja efectiva	17,7 bar

En els arxius de l'empresa es va trobar un projecte amb les dades del motor al 100% de càrrega. A més, es va trobar una fitxa tècnica del fabricant on hi havia informació sobre altres punts de funcionament del motor.

Taula 5.2. Característiques tècniques del motor.

	Dades projecte	Dades motor catàleg			
Càrrega		100	75	50	%
Potència mecànica del motor	3.800				kW
Potència elèctrica	3.720	4.300	3.225	2.150	kW
Rendiment mecànic del motor	43,65				%
Rendiment elèctric del motor	42,73	44,2	42,7	39,5	%
Consum combustible a 100 m.s.n.m (5% tolerància)	8.705	9.739	7.557	5437	kW
Calor dissipat al circuit de camises	1.252	1.377	1.018	707	kW
Calor dissipat en el circuit del Intercooler a 35 °C	325	356	255	163	kW
Calor dissipat en circuit d'oli lubricant	443	481	393	340	kW
Calor de gasos fins a 80° C	2.076	2.302	1.911	1.469	kW
Suma calor útil	3.771	4.160	3.322	2.516	kW
Radiació (motor + alternador)	246	303	282	273	kW
Aire de combustió	18.257	21.763	18.257	11.697	kg/h
Gasos d'escapament	18.899	22.564	17.220	12.145	kg/h
Temperatura gasos d'escapament	474	453	481	511	°C

D'acord amb el que s'observa a Taula 5.2, la potència del motor al 100% de càrrega segons el projecte de la instal·lació és inferior a la màxima potència segons catàleg. Es pot deduir pel menor consum de combustible, entre altres, que en realitat les dades del projecte corresponen a un punt d'operació del motor entre 100% i el 75% segons el catàleg. Per tal d'analitzar les dades d'aquesta taula a una mateixa escala de càrrega es va pren com a 100% de càrrega el valor del projecte.

D'aquesta manera, a partir de les dades de la Taula 5.2 es pot interpolar per conèixer el consum de combustible i la potència tèrmica dels gasos d'escapaments per diferents càrregues. Les rectes d'interpolació resultants seran útils de cara a la formulació del problema d'optimització.

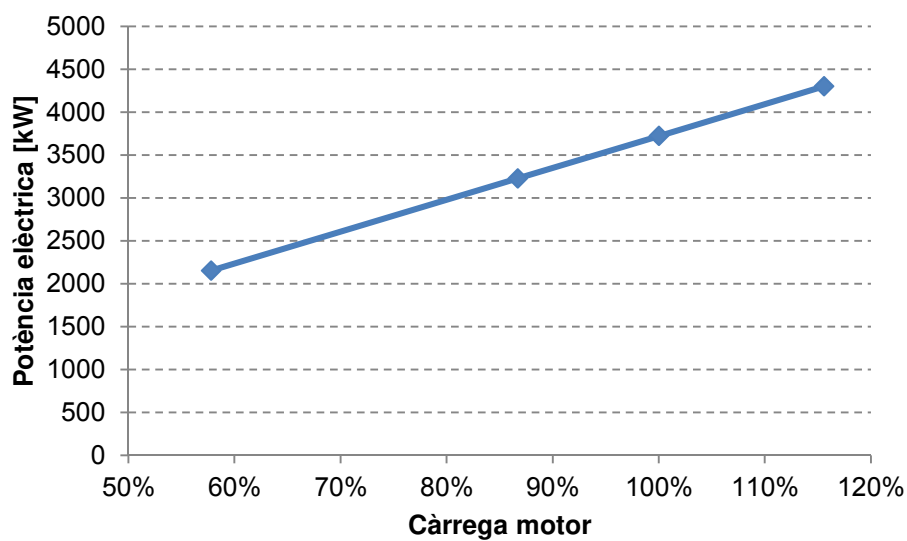


Figura 5.1. Potència elèctrica del motor de gas en funció de la càrrega.

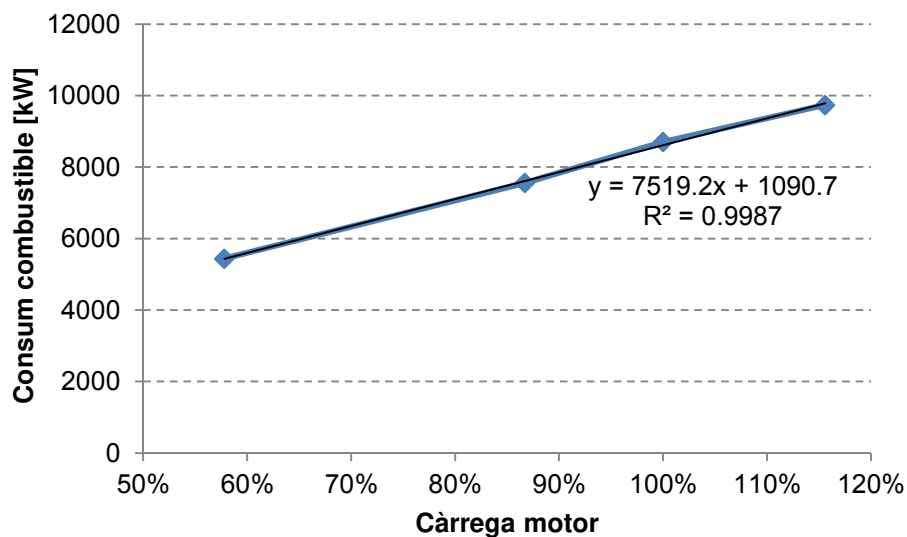


Figura 5.2. Consum de combustible en funció de la càrrega del motor.

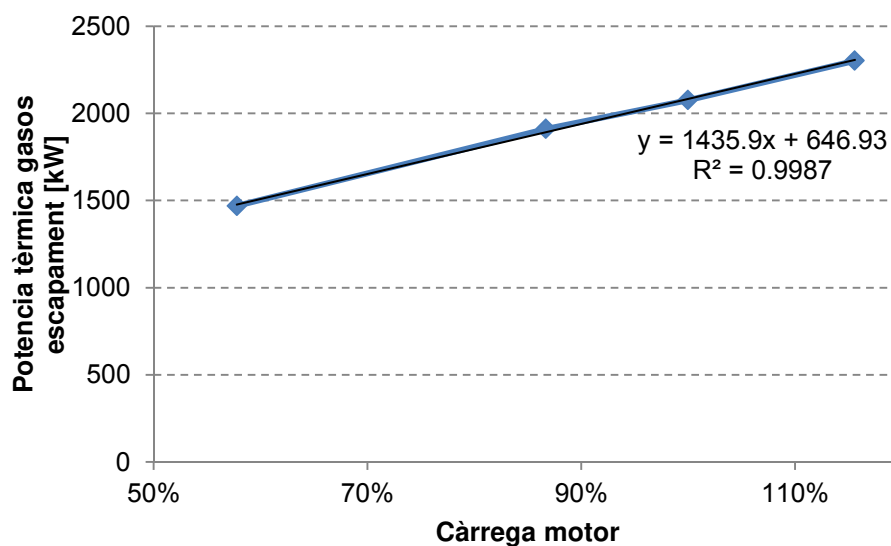


Figura 5.3. Potència tèrmica dels gasos d'escapament en funció de la càrrega del motor.

S'observa que el coeficient de determinació de les rectes de regressió presentades en les anteriors gràfiques és pròxim a 1 pel que es conclou que és bona la interpolació entre les càrregues del 60% al 115%. Així doncs, es té una estimació molt acceptable del consum de combustible i la potència tèrmica dels gasos d'escapament considerant que, segons recomanacions del fabricant, actualment aquest motor només treballa entre el 87% i el 63% respecte el nominal de 3.720 kW.

A nivell informatiu també s'ha graficat el cabal de gasos de combustió i la seva temperatura per veure com varia depenent de la càrrega del motor. S'observa que a menor càrrega els gasos s'escalfen més perquè els cicles són més llargs (més temps de residència a la cambra de combustió). El cabal augmenta a mesura que augmenta el número de cicles de combustió per unitat de temps, ja que hi ha més renovacions d'aire i combustible.

Es pot deduir que a càrregues molt baixes el motor té més problemes de refrigeració, per la major temperatura a la que arriben els gasos. Atenent això el fabricant imposa el límit inferior del 63% de càrrega. El límit superior del 87% ve donat per no forçar els límits mecànics de la màquina. El fet de respectar aquests límits és important per tal d'augmentar la vida útil del motor i reduir els costos de manteniment.

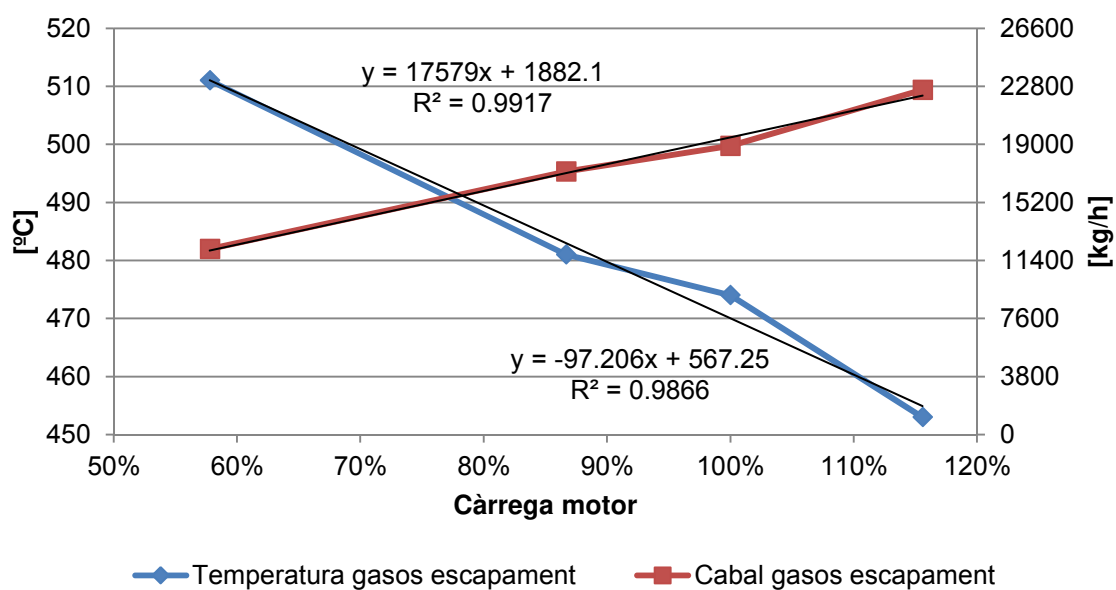


Figura 5.4. Temperatura i cabal dels gasos d'escapament en funció d'ela càrrega del motor.

6. Condicions econòmiques

En aquest capítol es descriuen les condicions econòmiques i legals que afecten a la compra i la venda d'electricitat en el cas d'estudi.

6.1. Aspectes generals dels mercats elèctrics

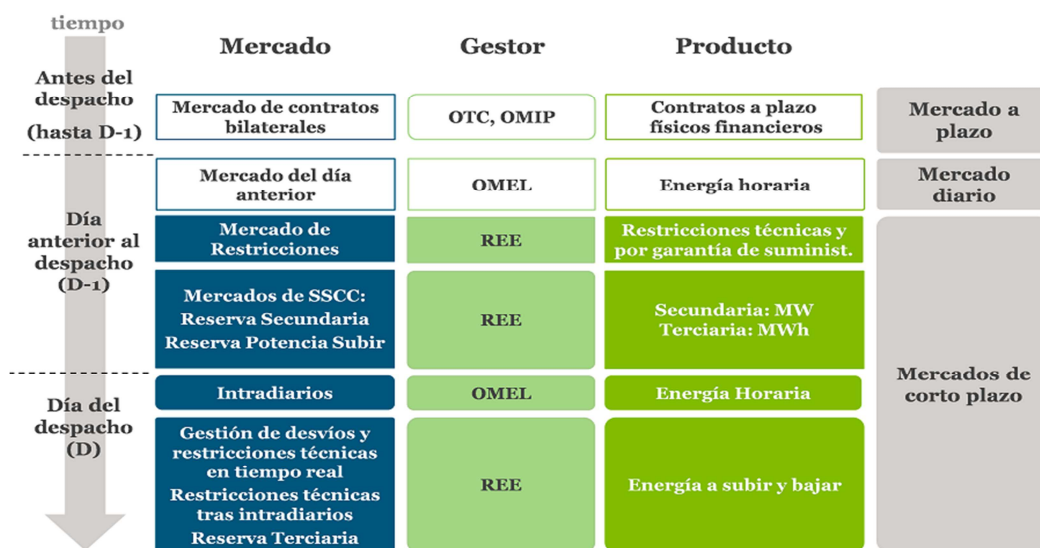


Figura 6.1. Resum dels mercats elèctrics [2].

Per entendre els diferents conceptes que apareixen en la factura elèctrica, en primer lloc cal conèixer els diferents mercats elèctrics.

Tal com es pot veure a la Figura 6.1, la primera fase de la negociació de l'energia elèctrica són mercats a futurs on es negocia la producció d'energia a llarg termini. No obstant, els mercats d'interès a nivell de compressió de la factura elèctrica són els mercats diaris (que es produeixen el dia abans del despatx de l'energia) i els intradiaris (que es produeixen el mateix dia).

El mercat diari és el que s'utilitza per fixar el preu de referència de l'energia elèctrica. En aquest mercat els productors d'energia han d'oferir el que serà la seva producció d'energia pel dia següent. Es van assignant ofertes de menor a major preu fins a cobrir la demanda, de manera que l'últim productor que s'assigna, marca el preu de l'energia. El mix de productors que han estat assignats configuren el programa base de funcionament (PBF).

El PBF no és 100% viable tècnicament i per això apareix el mercat de restriccions tècniques que modifica aquest programa. A més a més, el dia abans també es realitzen els mercats de reserva secundaria i reserva de potència a pujar, per tal de tenir garanties, en el subministrament elèctric, en cas que la demanda prevista sigui diferent de la real.

Finalitzat el mercat diari, i després del processus de restriccions tècniques, es duen a terme els mercats d'ajustos (denominats mercats intradiaris) que permeten als compradors i venedors que ho desitgin realitzar ofertes de compra i venda d'energia elèctrica per ajustar els seus programes de producció i consum a les seves millors previsions del que necessitaran en temps real. Després dels mercats interdiaris també s'han d'aplicar les diferents restriccions tècniques que sorgeixin.

Finalment, en el moment del despatx de l'energia, s'apliquen noves restriccions i penalitzacions, si s'escau, en cas d'incomplir els programes.

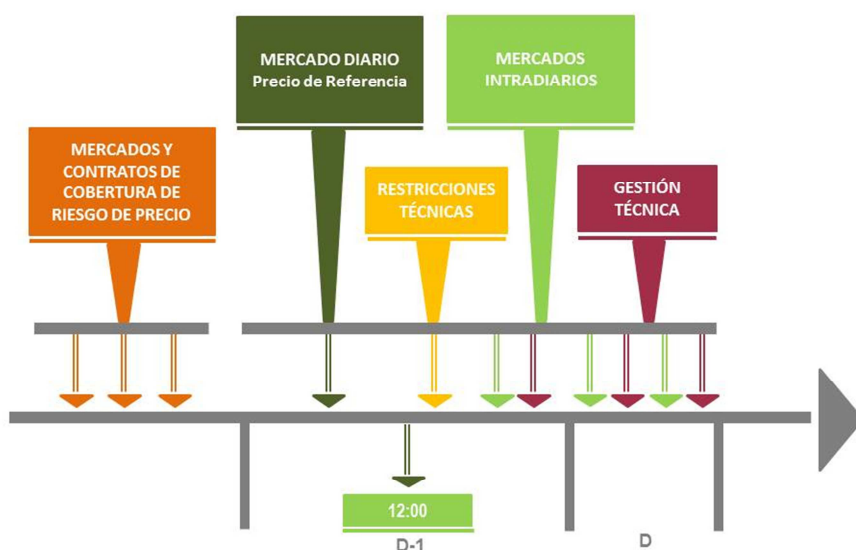


Figura 6.2. Seqüència de temps dels mercats i processos del MIBEL [3].

La planta de Bujaraloz, com a consumidor i com a productor, participa en aquests mercats a través d'empreses comercialitzadores. Aquestes empreses, en funció de tots programes previstos per tots els seus clients, realitzen les ofertes que consideren oportunes. Per això, la planta de Bujaraloz únicament ha de facilitar informació sobre quin serà el seu consum i la seva generació aproximada, sense intervenir directament en els mercats. No obstant, en la facturació i el cobrament d'electricitat influiran tots els aspectes comentats sobre la comercialització de l'energia elèctrica.

6.2. Compra electricitat

6.2.1. Conceptes de la factura

La facturació elèctrica depèn de la tensió a la que s'alimenta el consumidor. La planta de Bujaraloz s'alimenta a 25 kV, pel que li correspon la tarifa 6.1A (1kV a 30kV). A més també cal considerar la màxima potència que pot consumir (capacitat de la xarxa) que en aquest cas és de 1.500 kW.

A continuació s'enumeren els diferents conceptes que apareixen en la factura elèctrica. Es pot comprovar com a banda dels costos derivats dels mercats elèctrics també hi ha una part important de la factura que es regulada.

Energia al preu del mercat diari

Tal com s'ha vist en l'apartat anterior, el preu de l'energia a preu del mercat diari és el que resulta del mercat on els generadors ofereixen energia per hores el dia anterior del consum. Aquest preu s'aplica a l'energia consumida de la xarxa per la planta.

Pagaments per capacitat

Pagament regulat per finançar el servei de capacitat de potència a mig i llarg termini. Aquest pagament bé regulat per orde ministerial i es renova anualment. L'any 2016 l'orde IET/2735/2015 estableix el preu unitari a pagar per energia consumida en cada període horari. A la Taula 6.1 es mostren els pagaments per capacitat que s'apliquen al cas d'estudi ja que la planta està connectada directament a 25 kV.

Taula 6.1. Pagaments per capacitat.

Peatges d'accés	Preu unitari per al finançament dels pagaments per capacitat €/kWh					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
6.1A (1 kV a 30 kV)	0,006432	0,002969	0,001979	0,001484	0,001484	0

Banda secundària

Servei que es paga a alguns generadors amb capacitat de regulació per tenir una certa potència disponible per pujar o baixar del sistema i també per la utilització d'aquesta potència. Les ofertes de potència a pujar i baixar s'assignen als generadors en ordre de preu més baix.

Restriccions

Cost de viabilitzar el Programa Base de Funcionament (PBF) per garantir la cobertura de la demanda prevista i el compliment dels criteris de fiabilitat i seguretat establerts.

Restriccions a temps real

Cost de la resolució de les restriccions tècniques identificades durant l'operació a temps real que implica la modificació dels programes de funcionament i tenen un sobre cost pel sistema.

Desviaments

Sobre cost originat per l'aparició de desviaments al sistema. Es repercuteix als agents que s'han comportat en contra les necessitats del sistema incomplint els respectius programes

de generació i consum.

Reserva de potència

Pagaments als generadors per tenir capacitat d'incrementar la seva potència.

Cost de gestió

Pagament per la gestió a la comercialitzadora d'electricitat. Pot ser en funció de l'energia consumida, fix o mixt.

Retribució OMIE+REE.

Cost de la gestió de OMIE (Operador del Mercat Ibèric de l'Energia) i Red Eléctrica Espanyola.

Servei d'interrumpibilitat

Retribució que perceben grans consumidors per la seva disposició a baixar la seva demanda en cas que es produeixi una situació de manca de generació.

Peatges ATR (Accés de tercers a la xarxa)

Els peatges d'accés corresponen a l'ús que fa els generadors i consumidors de la xarxa del distribuïdor. Aquest pagament és fixat pel govern i l'any 2016 venia regulat per l'ordre IET/2444/2014. Hi ha un terme per la potència contractada i un per l'energia consumida.

Taula 6.2. Pagaments ATR.

Tarifa 6.1A (1 kV a 30 kV)	Període 1	Període 2	Període 3	Període 4	Període 5	Període 6
Terme potència (€/kW i any)	36,139	19,587	14,334	14,334	14,334	6,5402
Terme energia (€/kWh)	0,0267	0,0199	0,0106	0,0053	0,0034	0,0021

Impost a l'Energia Elèctrica

Impost especial subjecte a IVA del 5,11269632%. Es justifica l'aplicació d'aquest impost amb l'impacte mediambiental del consum d'energia elèctrica.

Aportació als fons d'eficiència energètica

Pagament regulat al que han de fer front les empreses. Per l'any 2016, l'ordre IET/359/2016 estableix l'import a pagar de les diferents empreses.

Coeficient k

Concepte amb el qual la comercialitzadora elèctrica cobreix la taxa municipal d'aprofitament

del sòl del 1,5%.

6.2.2. Períodes horaris

Tal com s'ha vist en alguns conceptes de la factura, el cost d'alguns pagament depèn del període horari. La distribució d'aquests períodes horaris durant l'any es pot observar en la Figura 6.3.

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
00 A 01	P 6											
01 A 02												
02 A 03												
03 A 04												
04 A 05												
05 A 06												
06 A 07												
07 A 08												
08 A 09	P2	P4	P5		P4	P2	P2	P6	P4	P5		P2
09 A 10	P1				P3	2ª QUINZENA			P1			P3
10 A 11	P2	P3	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
11 A 12						2ª QUINZENA						P1
12 A 13	P2	P4	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
13 A 14						2ª QUINZENA						P1
14 A 15	P2	P3	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
15 A 16						2ª QUINZENA						P1
16 A 17	P2	P4	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
17 A 18						2ª QUINZENA						P1
18 A 19	P2	P3	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
19 A 20						2ª QUINZENA						P1
20 A 21	P2	P4	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
21 A 22						2ª QUINZENA						P1
22 A 23	P2	P3	P5		1ª QUINZENA	P2	P2	P6	P4	P5		P2
23 A 24						2ª QUINZENA						P1

Figura 6.3. Distribució del períodes horaris durant l'any 2016.

A més, també es consideren com a període 6, tots els dissabtes, diumenges i festius.

Els festius a Aragó que coincideixen en dies laborables de l'any 2016 són els següents:

- Dies del mes de gener: 1 i 6
- Dies del mes de març: 24 i 25
- Dies del mes de maig: 2
- Dies del mes d'agost: 5 (festa local), 15 i 29 (festa local)
- Dies del mes d'octubre: 12
- Dies del mes de desembre: 6, 8 i 26

Segons la Figura 6.3. *Distribució del períodes horaris durant l'any 2016.* els festius del mes d'agost no cal considerar-los ja que tot el mes és període 6.

S'observa que hi ha 5 patrons de distribució de períodes que defineixen de la següent manera:

- Patró 1: dies laborables de gener, febrer, 2ª quinzena de juny, juliol i desembre
- Patró 2: dies laborables de març i novembre

- Patró 3: dies laborables d'abril, maig i octubre
- Patró 4: dies laborables de la 1^a quinzena de juny i setembre
- Patró 5: agost, dissabtes, diumenges i festius.

Els períodes horaris també s'utilitzen en la contractació de potència. S'ha de satisfer que la potència del període ha de ser més gran o igual a la del període anterior, ordenats de 1 a 6 [4].

6.3. Venda electricitat

6.3.1. Ingressos venda electricitat

Retribució per la venda d'energia al mercat diari

La retribució per la venda d'energia al mercat diari correspon a un ingrés per l'energia venuda a xarxa a cada hora al preu de la hora en el mercat diari. La següent equació representa aquest ingrés per cada hora de l'any (t).

$$R_t^{mercat} = E_t^{ven} \cdot \frac{p_t^{mercat}}{1000} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

*El factor de 1.000 dividint correspon a la conversió de MWh a kWh.

On:

R_t^{mercat} : Retribució per la venda d'energia a mercat horària en €

E_t^{ven} : Energia excedentària horària abocada a xarxa en kWh.

p_t^{mercat} : Preu del mercat diari horari en en €/MWh

Retribució específica

La retribució específica constitueix una retribució addicional a la de mercat que poden percebre els productors a partir de fonts renovables, cogeneració i residus. Aquesta retribució es regula segons el RD 413/2014 en el marc de la llei 24/2013, del sector elèctric. Aquesta nova legislació apareix per tal d'eliminar la retribució del règim especial establert segons el RD 661/2007 i d'aquesta manera frenar les primes que s'havien configurat inicialment sense bon criteri. El RD 413/2014 i la llei 24/2013 han portat molta controvèrsia pel seu caràcter retroactiu respecte el RD 661/2007.

La retribució específica representa una substitució del règim especial. No obstant, en la nova retribució es complica la formulació i el govern es reserva la possibilitat de canviar paràmetres de la retribució cada mig any. D'aquesta manera no es dona cap garantia a inversors d'instal·lacions de producció elèctrica a partir de fonts renovables, cogeneració i residus.

La retribució específica es calcula segons l'Eq. 6.2:

$$R^{esp} = R^{inv} \cdot W^N + R^{op} \cdot E^{ven} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

On:

R^{inv} : Retribució a la inversió en €/MW. Valor invariant durant un semiperíode regulador (3 anys)

W^N : Potència nominal de la instal·lació en MW.

R^{op} : Retribució a la operació en €/MWh. Valor variable amb validesa de 6 mesos.

E^{ven} : Energia de venda a la xarxa en MWh.

Com es pot observar hi ha un terme fix (inversió) i un terme variable en funció de l'energia (operació). A continuació s'especifica el càlcul d'aquests termes.

Retribució a la inversió

La retribució a la inversió de la instal·lació tipus es calcula segons les Eq. 6.3, Eq. 6.4 i Eq. 6.5. Aquestes equacions s'han extret del RD 413/2014 i canvien en funció de l'any de la instal·lació i/o si s'estava percebent el règim especial amb anterioritat, entre d'altres.

$$Rinv_{j,a} = C_{j,a} \cdot VNA_{j,a} \cdot \frac{(t_j \cdot (1 + t_j)^{VR_j})}{(1 + t_j)^{VR_j} - 1} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

$$C_{1,a} = \frac{VI_a - \sum_{i=p}^{a+VU-1} \frac{Ing f_i - Cexp f_i}{(1 + t_j)^{i-a+1}}}{VI_a} \quad (\text{Eq. 6.4})$$

$$VNA_{j,a} = VI_a \cdot (1 + t_{j-1})^{p-a-1} - \sum_{i=a+1}^{p-1} (Ing_i - Cexp_i)(1 + t)^{p-i-1} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

On:

$Rinv_{j,a}$: retribució a la inversió anual per unitat de potència que li correspon a la instal·lació tipus amb autorització d'explotació definitiva l'any «a», cada any del semiperíode regulador «j», expressada en €/MW. El valor de $Rinv$ és el mateix cada any d'un semiperíode regulador.

$C_{j,a}$: coeficient d'ajust de la instal·lació tipus amb autorització d'explotació definitiva l'any «a» per al semiperíode regulador «j» expressat en tant per u.

$VNA_{j,a}$: valor net de l'actiu per unitat de potència, a l'inici del semiperíode regulador «j», per

a la instal·lació tipus amb autorització d'explotació definitiva l'any «a», expressada en €/MW.
 t_j : taxa d'actualització que pren com a valor el de la rendibilitat raonable establerta per al semiperíode regulador «j», expressada en tant per u.

VR_j : vida residual de la instal·lació tipus, entesa com el nombre d'anys que li falten a l'inici del semiperíode regulador «j» a la instal·lació tipus per assolir la seva vida útil reguladora.

VU : vida útil reguladora de la instal·lació tipus expressada en anys. Valor fix establert en ordre ministerial.

VI_a : valor estàndard de la inversió inicial de la instal·lació tipus amb autorització d'explotació definitiva l'any «a» per unitat de potència, expressada en €/MW.

a : any d'autorització d'explotació definitiva de la instal·lació tipus.

p : 2014, com a primer any complet del primer semiperíode regulador

$Ingfi$: estimació dels ingressos d'explotació futurs per unitat de potència que percebrà la instal·lació tipus l'any «i» fins al final de la seva vida útil reguladora. Els ingressos d'explotació inclouen els ingressos procedents de la venda de l'energia en el mercat i, si s'escau, els ingressos derivats de la retribució a l'operació, entre d'altres. Aquest valor s'expressa en €/MW.

$Cexpfi$: estimació del cost futur d'explotació, per unitat de potència, de la instal·lació tipus l'any «i» fins al final de la seva vida útil reguladora. Aquest valor s'expressa en €/MW.

Ing_i : ingrés total mitjà per unitat de potència percebut per la instal·lació tipus l'any «i», per als anys anteriors al 2014.

$Cexp_i$: estimació del cost d'explotació, per unitat de potència, de la instal·lació tipus l'any «i», per als anys anteriors al 2014.

Observacions sobre els paràmetres de càlcul:

- El coeficient d'ajust C està comprès entre 0 i 1. En cas que adopti valors negatius, es considera que C agafa el valor zero i, en cas que adopti valors superiors a la unitat, es considera que C agafa el valor u.
- El valor net de l'actiu per unitat de potència, a l'inici del semiperíode regulador «j», per a la instal·lació tipus amb autorització d'explotació definitiva l'any «a», $VNA_{j,a}$, és igual al valor estàndard de la inversió inicial de la instal·lació tipus amb autorització d'explotació definitiva l'any «a» per unitat de potència, expressada en €/MW (VI_a).
- Com a t_j es pren la rendibilitat del bons de l'Estat a 10 anys de conformitat amb el que estableix l'article 19 del RD 413/2014.
- Els paràmetres fixats pel govern, mitjançant ordre ministerial, són: VU , $Ingfi$, $Cexpfi$, Ing_i i $Cexp_i$.

En l'ordre ministerial IET/1045/2014, a partir dels paràmetres esmentats, es fixa la retribució

a la inversió pel primer semiperíode regulador (2014-2016). En la mateixa ordre ministerial ja es dona el valor de la retribució a la inversió calculat.

Taula 6.3. Codi de la instal·lació de la planta de cogeneració de Bujaraloz establerta en l'ordre IET/1045/2014.

Classificació de les instal·lacions tipus segons el Reial decret 413/2014					
Grup	Subgrup	Combustible	Subtipus de tecnologia	Any d'autorització d'explotació definitiva	Codi Instal·lació Tipus
a.1	a.1.1	Gas Natural	1 < P ≤ 10 MW	2010	IT-01205

Taula 6.4. Informació sobre la instal·lació tipus de la planta de Bujaraloz extreta de l'ordre IET/1045/2014.

Codi d'Identificació	Vida Útil Reguladora (anys)	Coeficient d'ajust 'C1,a'	Retribució a la Inversió 'Rinv' 2014-2016 (€/MW)	Nombre hores equivalents de funcionament mínim 'Nh' anual 2014-2016 (h)	Llindar de funcionament 'Uf' anual 2014-2016 (h)	Percentatges aplicables a Nh i Uf anuals, per al càlcul del nombre d'hores equivalents de funcionament mínim i del llindar de funcionament dels períodes 3,6 i 9 mesos (%)		
						3 mesos	6 mesos	9 mesos
IT 01205	25	1	56.924	2.760	840	15%	30%	45%

Retribució a l'operació

La formulació del càlcul a la retribució a l'operació des l'inici de l'aplicació del RD 413/2014 ha estat modificada varis cops. Per l'any 2016 aquesta formulació és més complexa que el càlcul a la retribució a la inversió. Les expressions de càlcul es presenten en l'ordre IET/1345/2015. En aquesta ordre es fixa la retribució a l'operació en funció del tipus de combustible.

Pel cas del gas natural com a combustible, que correspondria a la instal·lació que s'estudia en aquest treball, la retribució a la operació depèn, entre d'altres, de la mitjana de les cotitzacions al mercat Henry Hub (HH), els costos en frontera, les pèrdues de regasificació i transport, els futurs del barril de Brent, el cost d'emmagatzematge subterrani i d'altres paràmetres fixats pel govern segons la instal·lació tipus. Estimar aquestes variables requereix un alt coneixement del funcionament del mercat del gas i impliquen una formulació molt complexa que no entra dins l'abast d'aquest treball.

No obstant, igual que en el cas de la retribució a la inversió, en varies ordres ministerials ja es donen calculats els valors de la retribució a la operació per l'any 2016.

Taula 6.5. Retribució a la operació de la planta de Bujaraloz, l'any 2016.

	1r semestre	2n semestre
Ordre ministerial	IET/2735/2015	IET/1209/2016
Retribució a l'operació [€/MWh]	47	37

Condicions règim retributiu específic

Per tal de percebre el règim retributiu específic s'han de complir les següents condicions:

1. Hores de funcionament mínimes

Segons l'article 20.4 del RD 413/2014 hi haurà correccions en el règim retributiu específic segons les hores de funcionament. Per això es defineixen els següents paràmetres:

- *Nhinst*: nombre d'hores equivalents de funcionament anuals de la instal·lació.
- *Uf*: llindar de funcionament de la instal·lació tipus en un any.
- *Nhmin*: nombre d'hores equivalents de funcionament mínim de la instal·lació tipus en un any.

Uf i *Nhmin* es fixen per ordre ministerial i són vàlids durant 3 anys (1 semiperíode regulatori). Pel 2016, aquests valors es troben a la Taula 6.4 extrets de la ordre IET/1045/2014.

Es poden presentar el següents casos:

- *Nhinst* > *Nhmin*: es percep el total del règim retributiu
- *Nhmin* > *Nhinst* > *Uf*: s'aplica un coeficient de reducció ("d") en la retribució específica.

$$d = \frac{Nhinst - Uf}{Nhmin - Uf} \quad (\text{Eq. 6.6})$$

- *Uf* > *Nhinst*: es perd el dret a percebre la retribució específica.

En cas que la cogeneració funcione tot l'any a plena potència es produirien 32.676 MWhe. Les dades de l'any 2016 indiquen que s'han produït 10.913 MWhe, això equival a 2.933 hores equivalents de funcionament, el qual es superior al *Nhmin* de 2.760 hores. Per tant, es va percebre el total del règim retributiu.

2. Rendiment Elèctric Equivalent

Segons la disposició transitòria novena del RD 413/2014, les instal·lacions de cogeneració que tenien reconeguda retribució primada a l'entrada en vigor del Reial

decret llei 9/2013, de 12 juliol, han de complir amb un rendiment elèctric equivalent (REE) mínim per tal de percebre el nou règim retributiu específic.

En l'annex XIV del mateix RD es descriu la metodologia de càlcul d'acord amb l'Eq. 6.7.

Pel cas en què s'utilitza gas natural com a combustible en motor tèrmics, la condició d'eficiència energètica es que el valor del rendiment elèctric equivalent sigui major al 55%.

$$REE = \frac{E}{F - \frac{H}{Ref H}} \quad (\text{Eq. 6.7})$$

On:

E: energia elèctrica generada mesurada en borns d'alternador, expressada en MWh.

F: consum de combustible tant de la cogeneració com dels dispositius de postcombustió en cas que n'hi hagi. Aquest valor s'expressa en MWh_{PCI}.

H: producció de calor útil o energia tèrmica útil per satisfer una demanda econòmicament justificable de calor o refrigeració. Aquest valor s'expressa en MWh.

Ref H: valor de referència del rendiment per a la producció separada de calor que apareix publicat a l'annex II de la Decisió de la Comissió de 19 de desembre de 2011, (Taula 6.6) per la qual s'estableixen valors de referència harmonitzats per a la producció per separat d'electricitat i calor.

Taula 6.6. Valor de referència del rendiment per la producció separada de calor.

Tipus de combustible	Vapor/aigua calenta *	Ús directe dels gasos d'escapament
Gas natural	90%	82%

* Per temperatura dels gasos es major o igual a 250 °C s'ha d'utilitzar el valor d'ús directe dels gasos d'escapament

6.3.2. Costos per la venda d'electricitat

Peatge d'accés a la generació d'energia elèctrica

Per tal de frenar les primes a la generació renovable l'any 2010 es va crear aquest peatge el qual és una taxa en funció de l'energia excedentària que s'aboca xarxa. A l'Eq. 6.8 es presenta el càlcul del cost d'aquest peatge.

$$C^{PG} = E^{ven} \cdot \frac{p^G}{1000} \quad (\text{Eq. 6.8})$$

On,

E^{ven}: Energia excedentària venuda a la xarxa en kWh.

P^G : Taxa per energia generada que segons estableix el RDL 14/2010 i el RD 1544/2011 és de 0,5 €/MWh.

Impost sobre el valor de l'energia generada

Amb el mateix propòsit que el peatge d'accés a la generació elèctrica, es va crear un impost sobre el valor de l'energia generada, que en altres paraules seria una taxa sobre la retribució que està en funció de l'energia generada. Aquestes retribucions són les obtingudes per la venda d'energia a mercat i la retribució a la operació, de manera que l'equació de càlcul d'aquest cost seria la següent:

$$C^{IG} = (R^{op} + R^{mercat}) \cdot I^G \quad (\text{Eq. 6.9})$$

On:

R^{op} : Total de la retribució a la operació en €.

R^{mercat} : Total de la retribució per venda d'energia a mercat en €.

I^G : taxa de l'impost sobre l'energia generada expressada en tant per u, el qual segons defineix la llei 15/2012 serà d'un 7% del 2013 fins el 2047.

6.4. Autoconsum

El Reial decret 900/2015, pel qual es regulen les condicions administratives, tècniques i econòmiques de les modalitats de subministrament d'energia elèctrica amb autoconsum i de producció amb autoconsum, va introduir uns nous càrrecs per l'autoconsum. Aquests càrrecs s'han denominat col·loquialment com l'impost al sol pel seu impacte sobre l'energia fotovoltaica. No obstant, segons el que estableix el RDL, els càrrecs també són aplicables a instal·lacions de cogeneració.

Aquests càrrecs es justifiquen com un substitut dels peatges d'accés a tercers a la xarxa (ATR) per aquells que estiguin practicant alguna modalitat d'autoconsum.

Per l'any 2016, els càrrecs per autoconsum que es van assignar a la modalitat 6.1A es van establir en la ordre ministerial IET/2735/2015.

Taula 6.7. Càrrecs a l'autoconsum segons la ordre IET/2735/2015.

6.1A (1 kV a 30 kV)	Període 1	Període 2	Període 3	Període 4	Període 5	Període 6
Càrrec fix (€/kW i any)	22,474651	8,056099	9,872687	11,969862	14,27913	4,91199
Càrrec transitori per energia autoconsumida(€/kWh)	0,012995	0,012837	0,008996	0,010431	0,011206	0,007951

Es defineix com energia autoconsumida, la diferència entre l'energia horària neta generada i l'abocament horari.

La potència d'aplicació del càrrec es defineix de la següent manera: quan es disposi d'un equip de mesura en el circuit de consum que registri l'energia consumida total pel consumidor associat, la potència d'aplicació de càrrecs és la potència que correspondria facturar als efectes d'aplicació dels peatges d'accés en un període tarifari si el control de la potència demandada es fes utilitzant aquest equip de mesura i control.

Aquest càrrec fix, sol s'aplica si la instal·lació compta amb bateries per reduir la potencia contractada amb la companyia elèctrica o si el consum pic supera la potència contractada amb la companyia elèctrica. Aquest càrrec es pagarà per la fracció de les hores en què hi hagi autoconsum [5].

Transitòriament aquest càrrec no s'aplicarà a la cogeneració fins l'any 2020. No obstant, es tindrà en compte en aquest treball per tal d'analitzar el seu impacte.

6.5. Compra GNL

Per conèixer el cost de la compra del gas natural liquat (GNL) s'ha demanat tenir accés a les factures de l'any 2016.

El cost del GNL, encara que depèn de factors de mercat com el cost de barril de Brent entre d'altres, també té una part pactada entre la companyia subministradora i el client. A més, s'ha de considerar una part del preu del transport terrestre.

A la Taula 6.8 es fa un recull dels diferents conceptes que apareixen a les factures.

S'hi observa que per una part hi ha l'impost especial als hidrocarburs (IEH), d'acord amb el que estableix la llei 15/2012 en línia amb la Directiva Europea 2003/96/CE. Pel pagament d'aquest impost es computa part de l'energia consumida a un preu i part a un altre dependent del tipus de repercussió.

El factor d'utilització representa el consum diari mínim que s'ha pactat amb la companyia. En cas que el resultat del consum dividit entre els dies del mes sigui inferior al pactat amb la companyia, s'aplicarà els kWh/dia/mes pactats. Si aquest resultat és superior, s'aplicarà els kWh/dia/mes calculats.

Finalment, el preu unitari representa el preu propi del gas variable diàriament en funció del cost del barril de Brent, entre d'altres. No obstant, partint de la informació de les factures, en aquest treball, es considerarà que varia mensualment.

Pel que fa al transport, hi ha una part pel número de viatges realitzats pel camió i una part en funció de les tones de gas transportades.

Taula 6.8. Resum dels conceptes de les factures relacionades amb el consum de GNL dels mesos de gener i febrer de 2016.

	Gener	Febrer
GNL		
Factor utilització [kWh/dia/mes]	89.250	89.250
Càlcul factor utilització real [kWh/dia/mes]	88.927,73	799.02,97
Preu unitari [€]	0,028806	0,028806
Consum [kWh]	2.667.832	2.397.089
Preu unitari [€]	0,019537	0,018221
Repercussió cost IEH (0,15 €/GJ) [kWh]	1.149.835,59	1.033.145,4
Preu unitari [€]	0,00054	0,00054
Repercussió cost IEH (0,65 €/GJ) [kWh]	1.517.996,41	1.363.943,6
Preu unitari [€]	0,00234	0,00234
Total sense IVA [€]	58.865,39	49.997,82
IVA [€]	12.361,73	10.499,54
Total factura [€]	71.227,12	60.497,36
TRANSPORT		
Consum [t]	175,46	157,65
Preu unitari [€/t]	25,335	25,335
Número viatges	9	8
Preu peatges unitari [€/viatge]	88,76	88,76
Total sense IVA [€]	5.244,14	4.704,25
IVA [€]	1.101,268	987,89208
Total factura [€]	6.345,40	5.692,14
TOTAL (TRANSPORT + GNL)		
Total [€]	77.572,53	66.189,50
Cost mig mensual [€/kWh]	0,02908	0,02761

A la següent pàgina s'inclou una taula amb els valors del preu final del GNL per cada mes de l'any 2016.

Taula 6.9. Taula de preu mig mensual calculat per kWh (any 2016).

	Preu [€/kWh]
Gener	0,029272
Febrer	0,027617
Març	0,026586
Abril	0,026278
Maig	0,025782
Juny	0,026192
Juliol	0,026929
Agost	0,027104
Setembre	0,027698
Octubre	0,028836
Novembre	0,029229
Desembre	0,029700

7. Definició del problema d'optimització

7.1. Objectiu

Definir un cas ideal de gestió de la planta per veure quin seria el menor cost del sistema decidint sobre l'operació del motor i la potència contractada.

Utilitzant el mateix model es farà una comparació amb el cost real de gestió de la planta prenent els valors que es van aplicar el 2016 sobre les variables de decisió.

Es comprovarà quin és el cas òptim tant amb l'aplicació dels peatges per autoconsum com sense, per tal de veure els efectes d'aquests peatges en el futur.

Finalment també s'analitzarà si és òptim canviar l'horari de funcionament de la fàbrica.

7.2. Consideracions prèvies

7.2.1. Compra d'electricitat

Per modelar la compra de l'electricitat es considera els següents punts:

- Els costos de compra d'energia, dels pagaments regulats ATR i els pagaments per capacitat, es poden trobar directament en funció de l'energia comprada i la potència contractada. Això es degut a que es disposa de dades del preu de mercat diari obtinguda de ESIOS [6] i dels preus base dels pagaments regulats (presentats en l'apartat 6.2.). Aquest grup de costos són els que tenen major pes en la factura elèctrica, aproximadament el 90% abans d'impostos.
- La resta de conceptes de la factura (banda secundària, restriccions, restriccions a temps real, desviaments, reserva de potència, cost de gestió, servei d'interrumpibilitat, aportació als fons d'eficiència, coeficient k i retribució a OMIE+REE) s'aproximen a partir de les dades de 5 factures de l'any 2016 a les quals s'ha tingut accés. S'estima que el total anual d'aquests costos ascendeix a 6.000€.

S'observa com alguns costos com el servei d'interrumpibilitat són més o menys constants, mentre que d'altres, com les restriccions i els desviaments varien en funció del mes.

El càlcul del cost dels desviaments i restriccions és complex, i impossible de predir, pel que no és adequat intentar modelar-lo atès que tampoc tenen un pes significatiu en el total de la factura.

Durant el 2016 es va treballar amb dues comercialitzadores, d'una no és té informació del seu marge i de l'altra per raons de confidencialitat tampoc s'inclou directament el seu cost de gestió.

7.2.2. Consum de gas

Sol es considera el cost del gas del motor, sense tenir en compte un possible estalvi de consum de gas en la deshidratadora o en la utilització de la caldera addicional de producció de vapor, ja que no es disposa de dades de consum de gasos d'escapament i de consum de vapor horaris i és difícil modelar un estalvi de consum de gas pròxim a la realitat. Atès que s'ha de complir el REE (rendiment elèctric equivalent), es considera que els resultats d'aprofitament de vapor, aigua calenta i gasos d'escapament serà similar al de les dades reals.

7.2.3. Tractament de dades

Les dades de partida de consum elèctric, s'han pres del *software* "Powerstudio". Tot i que les dades d'energia elèctrica horària del comptador de consum total són contínues i coherents, al llarg de l'any sempre s'han trobat alguns casos on hi ha buits de registre i dades no coherents, com consums per sobre del possible tècnicament. En alguns casos, aquests consums desorbitats sorgeixen com a suma agregada del consum a les hores buides en el registre.

Per aquest motiu, s'ha hagut d'analitzar hora a hora tots aquests casos i estimar les dades en funció del dia de la setmana (laboral, no laboral) i partint de la referència dels dies anteriors o posteriors.

7.2.4. Altres

No es considerarà el costos de manteniment per la operació del motor. Es considera que si s'opera en el marges que estipula el fabricant no hi ha d'haver canvis significatius en el cost respecte el cas real.

8. Formulació

En aquest capítol es defineixen les equacions que modelitzaran l'operació de la planta de cogeneració d'acord amb tot el que s'ha presentat en les anteriors seccions.

8.1. Glossari de conjunts, paràmetres i variables

En aquest apartat es recull la simbologia utilitzada en les equacions.

Per una banda hi ha els conjunts, com per exemple, les hores de l'any (8784 l'any 2016). També hi ha els paràmetres que s'aporten com a dades i finalment les variables, que són aquells valors que es calculen com a resultat de la optimització. Les variables es diferencien entre les de decisió i les auxiliars. Les variables auxiliars sorgeixen d'un càlcul amb les variables de decisió i/o algun paràmetre.

Taula 8.1. *Conjunts i subconjunts.*

T	Conjunt d'hores de l'any, indexat per t
M	Conjunt de mesos de l'any, indexat per m
S	Conjunt de semestres de l'any, indexat per s
P	Conjunt de períodes elèctrics, indexat per p
T_m^M	Subconjunt d'hores de l'any que pertanyen al mes m
T_s^S	Subconjunt d'hores de l'any que pertanyen al semestre s
T_p^P	Subconjunt d'hores de l'any que pertanyen al període p

Taula 8.2. *Paràmetres del motor de cogeneració i la xarxa.*

W^N	Potència nominal elèctrica de la instal·lació de generació [kW]
L^{min}	Càrrega mínima d'operació del motor de cogeneració [tant per u]
L^{max}	Càrrega màxima d'operació del motor de cogeneració [tant per u]
W^{xarxa}	Capacitat de compra a la xarxa elèctrica [kW]

Taula 8.3. Paràmetres econòmics i legals.

A_p^E	Terme en funció de l'energia dels pagaments regulats ATR durant el període p [€/kWh]
A_p^W	Terme en funció de la potència dels pagaments regulats ATR durant el període p [€/kW]
P_m^{gas}	Preu del GNL durant el mes m [€/kWh]
P_t^{mercat}	Preu de l'energia elèctrica al mercat diari durant la hora t [€/MWh]
U_s^{op}	Retribució a l'operació durant el semestre s [€/MWh]
U^{inv}	Retribució a la inversió [€/kW]
P^G	Taxa per l'energia excedentària abocada a la xarxa [€/MWh]
I^G	Taxa de l'impost sobre la retribució obtinguda per l'energia generada [tant per u]
P_p^{AE}	Càrrec per l'energia autoconsumida [€/kWh]
P_p^{AW}	Càrrec fix per autoconsum [€/kWh]
C^{altres}	Total anual dels altres costos per la compra d'electricitat [€]
I^e	Taxa de l'impost especial elèctric [tant per u]
IVA	Taxa de l'impost sobre el valor afegit [tant per u]
REE	Rendiment Elèctric Equivalent mínim [tant per u]

Taula 8.4. Paràmetres energètics.

E_t^{cons}	Consum d'energia elèctrica durant la hora t [kWh]
E_t^{ref}	Generació d'energia elèctrica de referència (dades d'operació reals del 2016) durant la hora t [kWh]
H_t^{desh}	Estimació del consum tèrmic, en gasos d'escapament, per la deshidratada durant la hora t [kWh]
H^{vapor}	Aprofitament tèrmic en vapor de la cogeneració anual [kWh]
H^{aigua}	Aprofitament tèrmic en aigua calenta de la cogeneració anual [kWh]
H^{gasos}	Aprofitament tèrmic directe dels gasos d'escapament de la cogeneració anual [kWh]
W_p^{cons}	Màxima potència del consum en cada període p [kW]

Taula 8.5. Variables de decisió.

W_p^{max}	Potència contractada en el període p [kW]
E_t^{gen}	Energia elèctrica generada en la hora t [kWh]
x_t	Variable binària que és igual a 1 si hi ha generació en la hora t , en cas contrari és 0

Taula 8.6. Variables auxiliars.

E_t^{ven}	Energia excedentària venuda durant la hora t [kWh]
E_t^{com}	Energia comprada durant la hora t [kWh]
F_t^{gas}	Consum de gas durant la hora t [kWh]
R_t^{mercat}	Retribució per l'energia venuda a mercat durant la hora t [€]
R_t^{op}	Retribució a la operació corresponent a la hora t [€]
R^{inv}	Retribució a la inversió [€]

Taula 8.7. Variables auxiliars.

C_t^{PG}	Cost pel peatge per l'energia excedentària corresponent a la hora t [€]
C_t^{gas}	Cost del gas consumit durant la hora t [€]
C_t^{IG}	Cost per la retribució rebuda sobre l'energia excedentària corresponen a la hora t [€]
C_t^{mercat}	Cost per l'energia comprada a mercat durant la hora t [€]
C_t^E	Cost pel pagament regulat ATR en funció de l'energia corresponent la hora t [€]
C^W	Cost total pel pagament regulat ATR en funció de la potència [€]
C_t^{AE}	Cost per l'energia autoconsumida durant la hora t [€]
C^{AW}	Cost fix per autoconsum [€]
R^{total}	Retribució total anual [€]
C^{com}	Cost total anual per la compra d'energia elèctrica [€]
C^{total}	Cost per l'energia autoconsumida durant la hora t [€]
H_t^{motor}	Energia en gasos d'escapament del motor durant la hora t [kWh]
$H_t^{útil}$	Energia aprofitada dels gasos d'escapament del motor durant la hora t [kWh]
$H_t^{pèrdues}$	Energia perduda dels gasos d'escapament del motor durant la hora t [kWh]
H_t^{add}	Energia addicional per cobrir la demanda tèrmica de la deshidratadora durant la hora t [kWh]
y_t	Variable binària que és igual a 1 quan es necessari energia addicional per garantir la demanda de gasos, i és 0 quan hi ha energia no aprofitada dels gasos d'escapament del motor

8.2. Restriccions

8.2.1. Límits de funcionament del motor

Per tal que el motor operi adequadament quan hi hagi generació ($x_t = 1$) la càrrega del motor ha d'estar entre el màxim (L^{\max}) i el mínim (L^{\min}) definits. Quan no hi hagi generació ($x_t = 0$) l'energia generada estarà acotada a 0.

$$E_t^{gen} \leq x_t \cdot W^N \cdot L^{\max}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$E_t^{gen} \geq x_t \cdot W^N \cdot L^{\min}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.2})$$

Per modelar els moments en què la fàbrica està parada, atès que es disposa de les dades de generació real (E_t^{ref}), s'imposa que quan la generació real sigui 0 la variable binària sigui 0 ($x_t = 0$).

Adicionalment, també es important modelar els moments d'avaries i d'engegada aturada de la fàbrica. Per saber quan s'està en un moment d'aquests, es comprova amb la generació real del 2016 si s'està operant per sota la càrrega mínima i s'imposa que l'energia generada sigui semblant a la real.

8.2.2. Balanç energètic

S'ha definit dos casos pel balanç energètic, de manera que quan es decideix que hi ha d'haver generació ($x_t = 1$) l'energia venuda serà més gran que zero i la compra serà zero. Quan es decideixi que no hi ha generació ($x_t = 0$) es donarà el cas contrari. Amb aquesta formulació s'aconsegueix tenir diferenciat amb 2 variables positives quanta energia elèctrica es ven a xarxa i quanta es compra.

$$E_t^{ven} = E_t^{gen} - x_t \cdot E_t^{cons}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.3})$$

$$E_t^{com} = (1 - x_t) \cdot E_t^{cons}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.4})$$

8.2.3. Retribució per la venda d'energia al mercat diari

Retribució que es percep per la venda d'energia al preu del mercat diari de la electricitat.

$$R_t^{mercat} = E_t^{ven} \cdot \frac{p_t^{mercat}}{1000}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.5})$$

*El factor de 1000 dividint correspon a la conversió de MWh a kWh.

8.2.4. Retribució específica

Com a retribució específica es diferencia entre la retribució a la inversió, la qual es fixa en funció de la potència de la instal·lació, i la retribució a la operació que depèn de l'energia venuda a xarxa.

$$R^{inv} = U^{inv} \cdot W^N \quad (\text{Eq. 8.6})$$

$$R_t^{op} = \frac{U_s^{op}}{1000} \cdot E_t^{ven}, \quad \forall t \in T_s^S, \quad \forall s \in S \quad (\text{Eq. 8.7})$$

*El factor de 1000 dividint correspon a la conversió de MWh a kWh.

8.2.5. Costos per la venda d'energia a xarxa

Per la venda d'energia a xarxa, hi ha associats 2 costos, el peatge per l'energia excedentària abocada a la xarxa (E_t^{ven}) i l'impost sobre la quantitat percebuda per l'energia generada, és a dir, sobre la retribució de mercat i la retribució específica a l'operació.

$$C_t^{PG} = E_t^{ven} \cdot \frac{P^G}{1000}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.8})$$

$$C_t^{IG} = (R_t^{op} + R_t^{mercat}) \cdot I^G, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.9})$$

*El factor de 1000 dividint correspon a la conversió de MWh a kWh.

8.2.6. Cost de l'energia consumida de xarxa

En el cas de comprar energia elèctrica a la xarxa s'ha d'abonar el preu del mercat diari de la electricitat.

$$C_t^{mercat} = E_t^{com} \cdot \frac{P_t^{mercat}}{1000}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.10})$$

*El factor de 1000 dividint és la conversió de MWh a kWh.

8.2.7. Contractació de potència elèctrica

En la contractació de potència per períodes hi ha la restricció que al potència del període ha de ser major o igual a l'anterior.

$$W_p^{max} \geq W_{p-1}^{max}, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.11})$$

Adicionalment en aquest cas hi ha restricció de la capacitat de la xarxa elèctrica:

$$W_p^{max} \leq W^{xarxa}, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.12})$$

Finalment cal especificar que la compra d'electricitat no sigui major a la potencia màxima contractada en el període.

$$E_t^{com} \leq W_p^{max}, \quad \forall t \in T_p^P, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.13})$$

8.2.8. Pagaments ATR i capacitat

A banda pel preu del mercat s'ha de fer front als pagament regulats ATR (Accés de tercers a la xarxa) i de la capacitat. Hi ha un pagament en funció de l'energia comprada (on es suma la part de ATR i la part de capacitat) i un altre per la potència contractada:

Terme en funció de l'energia

$$C_t^E = A_p^E \cdot E_t^{com}, \quad \forall t \in T_p^P, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.14})$$

Terme en funció de la potència contractada

$$C^W = \sum_p A_p^W \cdot W_p^{max}, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.15})$$

8.2.9. Consum de combustible per la generació d'electricitat

El consum de gas natural segueix l'Eq. 8.17 en funció de l'energia generada.

Aquesta fórmula s'ha extret de la Figura 5.1.

$$F_t^{gas} = 7519,2 \cdot \frac{E_t^{gen}}{W^N} + 1090,7 \cdot x_t, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.16})$$

8.2.10. Cost GNL

A partir del consum de gas es pot saber el cost del gas consumit en cada instant t :

$$C_t^{gas} = P_m^{gas} \cdot F_t^{gas}, \quad \forall t \in T_m^M, \quad \forall m \in M \quad (\text{Eq. 8.17})$$

8.2.11. Peatges per autoconsum

En cas de considerar l'aplicació dels peatges per autoconsum s'implementarien les restriccions que es presenten a continuació.

Terme en funció de l'energia

$$C_t^{AE} = x_t \cdot P_p^{AE} \cdot E_t^{cons}, \quad \forall t \in T_p^P, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.18})$$

Terme fix

$$C^{AW} = \frac{\sum_t x_t}{n_{horesany}} \cdot \sum_p P_p^{AW} \cdot (W_p^{cons} - W_p^{max}), \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (\text{Eq. 8.19})$$

8.2.12. Rendiment Elèctric Equivalent

Finalment s'ha de complir el valor mínim del Rendiment Elèctric Equivalent per tal d'accedir a la retribució específica. Si es vol saber en cada instant quanta energia dels gasos d'escapament està aprofitant la deshidratadora s'han d'aplicar les equacions que es presenten a continuació. y_t és una variable binària que ens indica, quan és positiva, que la deshidratadora requereix energia addicional o bé, quan és negativa, que no es pot aprofitar tota l'energia del motor i hi ha pèrdues.

$$H_t^{motor} = 1435,9 \cdot \frac{E_t^{gen}}{W^n} + 646,93 \cdot x_t, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.20})$$

$$H_t^{motor} + H_t^{add} \cdot y_t = H_t^{desh} + H_t^{perdues} \cdot (1 - y_t), \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.21})$$

$$H_t^{util} = H_t^{desh} - H_t^{add}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.22})$$

$$REE \leq \frac{\sum_t E_t^{gen}}{\sum_t \left[F_t^{gas} - \frac{H_t^{util}}{0,82} \right] - \frac{H^{vapor}}{0,82} - \frac{H^{aigua}}{0,9}}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.23})$$

Com es pot veure, aquesta restricció implica la no linealitat del problema i únicament s'aplicaria si, després d'optimitzar amb la resta de restriccions, el valor del rendiment elèctric equivalent fos menor a l'establert del 55%.

Per tal de simplificar aquesta restricció, es podria considerar que la energia útil dels gasos fos igual al valor real de l'any 2016 sempre que s'observés que la generació fos més gran o igual. D'aquesta manera s'estaria sent més restrictiu ja que no s'aprofitaria una major part d'energia provinent d'un major consum del motor. Tenint en compte això, la restricció quedaria formulada de la següent manera:

$$REE \leq \frac{\sum_t E_t^{gen}}{(\sum_t F_t^{gas}) - \frac{H^{gasos}}{0,82} - \frac{H^{vapor}}{0,82} - \frac{H^{aigua}}{0,9}}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.24})$$

8.2.13. Hores de funcionament

També s'hauria de comprovar que es compleix amb les hores de funcionament equivalent per tal de percebre el règim retributiu d'acord amb el que s'ha presentat en l'apartat 8.3.1. Aquesta restricció s'implementaria en última instància si s'observés que no es compleix amb la solució que retorna el programa.

8.2.14. Costos i retribucions total

Abans de presentar la funció objectiu, es calcula el cost total de la compra d'electricitat aplicant els impostos corresponents. Aquest cost es suma amb la resta de costos per la venda d'electricitat igual que també es sumen totes les retribucions per trobar el total.

$$R^{total} = R^{inv} + \sum_t (R_t^{mercat} + R_t^{op}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.25})$$

$$C^{com} = \left(C^W + C^{altres} + \sum_t C_t^E + C_t^{mercat} \right) \cdot (1 + I^e) \cdot (1 + IVA) \quad (\text{Eq. 8.26})$$

$$C^{total} = C^{com} + C^{AW} + \sum_t (C_t^{PG} + C_t^{IG} + C_t^{gas} + C_t^{AE}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Eq. 8.27})$$

8.3. Funció objectiu

La funció objectiu consisteix en minimitzar els costos restant els ingressos de les retribucions.

$$\min \left[C^{total} - R^{total} \right] \quad (\text{Eq. 8.28})$$

8.4. Casos d'estudi programats

Per dur a terme la programació del model d'optimització s'ha utilitzat el *software* "JuliaPro". Aquest programa utilitza Julia com a llenguatge de programació i JuMP com a paquet de funcions per implementar els problemes d'optimització.

A partir de la formulació presentada en aquesta secció s'ha implementat el model d'optimització amb el que s'ha trobat el cost total de la planta de cogeneració. Finalment la

restricció del rendiment elèctric equivalent i la de les hores equivalents no ha calgut implementar-les ja que la solució ja complia amb la normativa.

Per saber el cost amb les dades d'operació reals de la planta, s'ha modificat el model d'optimització eliminant les variables (que en aquest cas són dades), transformant les restriccions en simples equacions i finalment eliminant funció objectiu. A més, s'ha definit un paràmetre per tal de comprovar que la energia contractada en cada període era inferior a la consumida de la xarxa i s'han eliminat les restriccions dels límits de generació .

Tant el cas amb les dades reals com el model d'optimització s'han implementat amb i sense l'aplicació dels peatges per autoconsum. D'aquesta manera es pot veure l'efecte d'aquest peatge en la seva futura aplicació.

Per últim, en el model d'optimització s'ha comprovat si hi havia alguna millora en el cost modificant l'horari de funcionament de la planta. Si la planta va funcionar durant el 2016 de 6h a 22h de la nit, s'ha fet proves endarrerint els consums 1 i 2 hores de manera que es simula que la planta funcionava de 7h a 23h i de 8h a 24h. En aquests casos podria ser que hi hagués una reducció del cost, ja sigui per reducció de les tarifes de contractació de potència o per venda d'energia en hores amb preu de mercat més elevat.

A mode de resum s'han implementat el següents casos:

- Model d'optimització sense peatges per autoconsum
- Model d'optimització amb peatges per autoconsum
- Cas real sense peatges per autoconsum
- Cas real amb peatges per autoconsum
- Model d'optimització sense peatges per autoconsum amb horari modificat

9. Resultats

En aquest apartat s'analitzaran els resultats obtinguts amb els casos d'estudi definits en l'anterior capítol.

9.1. Anàlisi resultats del cas real

En primer lloc, s'ha comprovat que el codi implementat coincideix amb les dades reals, com per exemple, que el consum de gas modelat s'aproxima molt al consum real de gas del motor. Per tant, el rendiment elèctric equivalent pràcticament coincideix amb el real. Recordi's que el consum de gas depèn hora a hora en funció de la càrrega del motor i que s'ha aproximat el consum a partir d'una taula de característiques tècniques del grup generador. Del consum real del motor únicament es disposa de dades mensuals i no es pot saber sobre aquestes dades la relació de consum amb la càrrega d'operació.

Taula 9.1. Diferències entre els resultat real i del model.

	Consum anual motor [kWh]	REE
Real	26.893.421	60,7%
Modelat	26.816.794	60,4%
Error absolut	0,285%	0,448%

S'observa que hi ha un marge del 5% respecte el rendiment elèctric equivalent mínim normatiu.

Sobre el cost total real de la planta de cogeneració no es té dades però atès que aquest anàlisi únicament és per realitzar una comparativa, amb el cas optimitzat, no és necessari tenir-ho.

Les potències contractades que s'han indicat al model real són les següents:

Taula 9.2. Potències contractades l'any 2016.

P1	P2	P3	P4	P5	P6
250 kWh	250 kWh	250 kWh	400 kWh	500 kWh	1100 kWh

Al contrari dels subministraments domèstics, si es supera la potència contractada en alta tensió no s'interromp el subministrament. Per això, s'instal·len uns màxímetres que enregistren la potència màxima en períodes de 15 minuts. En cas de superar la potència contractada queda registrat i es paga penalitzacions significatives a la companyia comercialitzadora.

Per aquest motiu, l'empresa té establerta la norma estricta de no superar la potència

contractada. Després de la simulació, s'observa com efectivament s'ha complert la norma i s'ha mirat iterativament si es podien ajustar més les potències amb números arrodonits. A la Taula 9.3 es presenten els resultats.

Pel que fa a les dades de generació d'energia en el cas real, es tendeix a anar a una consigna exportació de 1.500 kWh. Aquest valor es fixat ja que tant si la planta opera a baixes càrregues com a càrregues altes, la desviació respecte la planificació que es passa a la companyia comercialitzadora no és molt significativa. Recordi's que per les desviacions, en funció de si s'ha anat en contra o a favor del sistema, es paguen penalitzacions.

9.2. Anàlisi dels resultats entre la optimització i cas real (sense autoconsum)

9.2.1. Potència contractada

Taula 9.3. Resum de resultats de la contractació de potència.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Real	250 kWh	250 kWh	250 kWh	400 kWh	500 kWh	1100 kWh
Optimització manual	0 kWh	250 kWh	250 kWh	250 kWh	400 kWh	800 kWh
Optimització	0 kWh	206 kWh	206 kWh	206 kWh	399 kWh	796 kWh

S'observa que la optimització feta manualment al model amb dades reals s'aproxima als resultats que ha retornat el model d'optimització. D'aquesta manera es té fiabilitat de que els valors retornats per l'optimització són correctes.

Pel que fa als resultats, s'observa que es pot ajustar més la potència en període 6. Aquesta potència ve condicionada bàsicament pels consums que es produeixen els dissabtes en què la fàbrica opera parcialment i no s'engeguen els motors.

Les potències del P2 al P5 vénen imposades pels consums que es produeixen de 10 a 12 de la nit quan la fàbrica està tancada i el motor no genera electricitat. Atès que quan el motor està aturat no coincideix mai en una franja del període 1, idealment no s'hauria de contractar potència en aquest període.

9.2.2. Costos i ingressos

Taula 9.4. Resum costos i ingressos de la cogeneració.

	Optimització	Dades reals
ENERGIA		
Energia generada [kWh]	13.037.493	10.921.620
Energia venuda [KWh]	7475201	5321.342
Energia comprada [kWh]	603.638	565.652
Consum combustible [kWh]	30.921.500	26.820.310
COSTOS		
Cost del combustible [€]	853.112	740.290
Impost sobre la retribució a l'energia generada [€]	45.648	32.691
Peatge a la generació [€]	3.738	2.661
Cost compra energia elèctrica a PMD [€]	21.346	20.126
Cost regulat en funció de la potència contractada [€]	20.866	37.610
Cost regulat en funció de l'energia consumida [€]	1.631	1.372
Altres costos [€]	6.000	6.000
Impostos compra electricitat [€]	13.550	17.700
Total costos	965.889	858.451
RETRIBUCIONS		
Retribució venda energia elèctrica a PMD [€]	339.022	244.534
Retribució a l'operació [€]	313.085	222.487
Retribució a la inversió [€]	211.757	211.757
Total retribució	863.864	678.777
TOTAL		
Cost total	102.025	179.674

Hi ha dos principals fonts que fan canviar el resultat de l'òptim respecte el real:

1. Augment de la generació. Analitzant hora a hora la generació s'observa que es porta el motor a la màxima càrrega ja que compensa econòmicament. 60.905 € d'estalvi corresponen a aplicar un pla de portar el motor, sempre que sigui possible, a màxima càrrega.
2. Ajust de la potència contractada. Un total de 16.744 € de l'estalvi prové de l'ajust de potència contractada.

La diferència que es compri més energia en el cas òptim es degut a que en moments d'engegada i aturada del motor el model interpreta que està treballant a molt baixa càrrega amb un consum de combustible elevat. Això implica que en aquestes hores no sigui rendible generar i per això hi ha més compra d'electricitat.

Atenent que l'anàlisi és hora a hora i hi poden haver aquestes petites incongruències, s'ha d'assumir que a la pràctica que el valor d'energia comprada seria el mateix.

9.2.3. Rendiment Elèctric Equivalent

Tenint en compte que ha augmentat la generació, s'ha de comprovar que es compleix el rendiment elèctric equivalent. En aquest cas s'ha considerat que els aprofitaments tèrmics són iguals que es van produir en realitat a l'any 2016. Aquest cas és més restrictiu ja que, per l'augment d'energia elèctrica generada hi ha un augment proporcional d'energia tèrmica disponible que podria donar lloc a nous aprofitaments que es desestimen. No obstant això, el valor de rendiment que retorna el programa és del 59%, per tant, compleix amb el 55% mínim normatiu.

Tot i l'augment de pèrdues en el model, el rendiment elèctric equivalent no varia gaire respecte el modelat amb les dades de generació reals (60,4%), a més, cal considerar que el rendiment elèctric modelat és unes dècimes més baix que el real.

Es pot considerar que a la pràctica el rendiment elèctric equivalent es mantindria igual d'acord amb el que es justifica a continuació.

Taula 9.5. Relació d'aprofitaments tèrmics de la cogeneració per mesos.

	Aigua calenta [kWh]	Vapor caldera cogeneració [kWh]	Gasos escapament deshidratadora [kWh]	Consum motor [kWh]	Aprofitament tèrmic en gasos del consum del motor	Aprofitament tèrmic en aigua calenta del consum del motor
Gener	157.214	240.712	0	2.065.774	12%	8%
Febrer	168.057	360.557	0	2.139.603	17%	8%
Març	182.900	377.396	700	2.204.485	17%	8%
Abril	179.418	221.542	123.800	2.143.105	16%	8%
Maig	183.069	220.341	199.900	2.247.949	19%	8%
Juny	222.725	144.222	381.900	2.352.742	22%	9%
Juliol	218.321	228.073	297.500	2.360.332	22%	9%
Agost	213.994	234.875	248.600	2.029.139	24%	11%
Setembre	260.810	238.678	311.500	2.485.027	22%	10%
Octubre	248.679	353.311	21.700	2.175.526	17%	11%
Novembre	249.958	274.230	128.000	2.335.096	17%	11%
Desembre	186.062	383.999	0	2.354.643	16%	8%
Total	2.471.207	377.933	1.713.600	26.893.421	19%	9%

Segons el que s'observa amb les dades mensuals reals, la relació d'aprofitament d'energia tèrmica del motor és major en els mesos en què la deshidratadora opera.

D'aquesta manera si el motor funciona a major potència durant l'estiu es pot deduir que hi haurà un major aprofitament per part de la deshidratadora, ja que únicament amb els gasos de la cogeneració no és suficient per satisfer les seves necessitats tèrmiques. A més, la temperatura dels gasos de combustió és suficientment alta com perquè no sigui necessari

un increment de temperatura posterior.

Durant l'hivern i, en general, les hores en què la deshidratadora està aturada, l'aprofitament dels gasos està subjecte a la demanda de vapor de la qual no se'n té dades horàries. No obstant, tenint en compte que de vegades és necessari posar en funcionament en paral·lel la caldera de vapor de la fàbrica ja que amb la cogeneració no és suficient, es pot concloure que també hi hauria un increment d'energia aprofitada.

Pel que fa a l'aigua calenta, també s'observa que quan funciona la deshidratadora hi ha un major aprofitament gràcies al recuperador aigua-aire. A l'hivern, si l'energia de l'aigua calenta excedent durant el dia s'emmagatzema en acumuladors d'inèrcia, hi ha un potencial d'energia tèrmica per escalfar grasses durant la nit. A més, això reduiria el consum elèctric base de les nits en resistències elèctriques i comportaria un estalvi en compra d'electricitat.

S'estima que el consum de les resistències a la nit és de 15 kW, corresponent al consum base que penja de les línies 1 i 4. Tenint en compte que es podria aprofitar energia durant les 8h nocturnes dels 250 dies laborables, hi hauria un total de 30.000 kWh d'energia aprofitada. És un xifra modesta en comparació amb el total d'aprofitaments, però econòmicament viable ja que s'aconseguiria uns estalvis anuals per compra d'electricitat d'aproximadament 1.800€, mentre que el cost aproximat d'un dipòsit d'inèrcia de 1.500 L (veure Eq. 9.1 pel càlcul del volum del dipòsit) ascendeix a 2.300€ [6]. Per tant, amb menys de 2 anys es retornaria la inversió sense considerar que també hi podria haver una reducció en el consum de les resistències per liquar el gas natural que s'utilitzen en l'engegada de fàbrica. El consum de la gasificació no es coneix amb exactitud però pot ser elevat ja que es troba inclòs dins dels serveis auxiliars del grup de gas, que representa uns 50 kW de consum base.

$$V_{dipòsit} = \frac{15 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ kJ}}{\text{kWh}}}{4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}}^{\circ\text{C}} \cdot 85^{\circ\text{C}} \cdot \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{1 \text{ L}}} = 1.214 \text{ L} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

També es podria estudiar la instal·lació d'acumuladors de vapor, però atès que no es té dades horàries es difícil estimar si seria econòmicament viable.

9.3. Anàlisi de l'aplicació del peatges per autoconsum

Taula 9.6. Resum de costos i ingressos de la cogeneració aplicant i sense aplicar els peatges per autoconsum.

	Optimització sense peatges per autoconsum	Optimització amb peatges per autoconsum	Dades reals amb peatges per autoconsum
ENERGIA			
Energia generada [kWh]	13.037.493	12.554.414	10.921.620
Energia venuda [KWh]	7.475.201	7.220.198	5.321.342
Energia comprada [kWh]	603.638	831.714	565.652
Consum combustible [kWh]	30.921.500	29.731.281	26.820.310
COSTOS			
Cost del combustible [€]	853.112	820.816	740.290
Impost sobre la retribució a l'energia generada [€]	45.648	44.279	32.691
Peatge a la generació [€]	3.738	3.610	2.661
Cost compra energia elèctrica a PMD [€]	21.346	28.907	20.126
Cost regulat en funció de la potència contractada [€]	20.866	25.411	37.610
Cost regulat en funció de l'energia consumida [€]	1.631	2.122	1.372
Altres costos [€]	6.000	6.000	6.000
Impostos compra electricitat [€]	13.550	16.975	17.905
Peatge variable autoconsum [€]	0	57.581	58.671
Peatge fix autoconsum [€]	0	86.950	82.870
Total costos	965.889	1.092.652	1.000.196
RETRIBUCIONS			
Retrobució venda energia elèctrica a PMD [€]	339.022	330.253	244.534
Retrobució a l'operació [€]	313.085	302.310	222.487
Retrobució a la inversió [€]	211.757	211.757	211.757
Total retrobució	863.864	844.320	678.777
TOTAL			
Cost total	102.025	248.332	321.419

Tal com es pot veure a la Taula 9.6 la planificació de generació amb l'aplicació dels peatges per autoconsum presenta certes variacions respecte el cas sense autoconsum. Degut al fort impacte econòmic del càrrec fix per autoconsum el programa d'optimització retorna que és més beneficiós contractar més potència i comprar electricitat en certs horaris que generar i haver de pagar igualment per la potència necessària pel consum. En la Taula 9.7 es pot

veure que les potències contractades es mantenen igual excepte en el període 6, on l'òptim de potència es situa prop de la màxima capacitat de la xarxa. Aquest període correspon a la frontera entre l'aturada i la posada en funcionament de la fàbrica. El nou valor de potència a contractar s'hauria de prendre únicament a nivell d'anàlisi de l'impacte dels càrrecs d'autoconsum. Seria necessari un anàlisi quarthorari per tal de veure si realment és possible, ja que segurament que en una fracció de la hora la potència consumida fos major que la capacitat de la xarxa i fos necessari generar, pel que es mantindria la potència contractada que havia resultat de la primera optimització sense autoconsum.

Per tal d'evitar pagar els peatges per autoconsum, es conclou que no compensaria operar el motor a la càrrega mínima i contractar potència en períodes cars per suplir la demanda romanent. A més es correria el risc de no complir amb les hores de funcionament equivalent per percebre el total del règim retributiu específic.

En les optimitzacions, la diferència de cost entre l'aplicació o no dels peatges per autoconsum ascendeix a 146.127 €, i això, tenint en compte que es tracta d'un cas idíl·lic. És una quantitat important que no es pot menysprear, però es considera que a priori no hauria de tenir efectes en l'operació de la planta.

Taula 9.7. Potència a contractar amb els peatges per autoconsum.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Potència amb peatges per autoconsum	0 kWh	206 kWh	206 kWh	206 kWh	399 kWh	1491 kWh

9.4. Anàlisi de la modificació de l'horari de funcionament

Actualment l'horari de la planta és de 6h a 22h. Observant la taula de períodes horaris elèctrics, coincideix que de 24h a 8h hi ha període 6 i podria ser que fos més rendible econòmicament operar entre aquest horari.

A la Taula 9.8 es poden observar els resultat d'enrederir els consums 1 i 2 hores per tal que coincideixin amb els horaris d'estudi de 7h a 23h i de 8h a 24h. Com a base de comparació s'ha utilitzat el model òptim sense autoconsum.

Taula 9.8. Comparativa de costos i ingressos en funció de l'horari de funcionament de la fàbrica.

Horari	de 6h a 22h	de 7h a 23h	de 8h a 24h
Cost total [€]	102.025	98.617	108.667
Estalvi [€]	-	3.408	-6.642
Percentatge estalvi	-	3%	-10%
Cost regulat en funció de la potència contractada [€]	21.346	20.094	27.380
Retribució venda energia elèctrica a PMD [€]	339.022	343.022	342.103

S'observa que hi ha un petit estalvi en l'horari de 7h a 23h, mentre que en l'horari de 8h a 24h el cost és superior.

En el cas de 7h a 23h l'estalvi ve principalment d'una reducció en la potència contractada en els períodes 2, 3 i 4 de 260 a 190 kW i d'un augment en la retribució per la venda d'energia a mercat, ja que a les 22 hores habitualment hi ha un pic de preus. Amb menor contribució a l'estalvi total, hi ha una reducció pel cost de comprar energia en hora punta i pels pagaments ATR en períodes cars.

L'horari de 8h a 24h no resulta viable ja que hi ha una augment en la potència contractada en el període 2, 3 i 4 de 260 a 341 kW. Aquest augment en la potència contractada és necessari ja que en les hores d'obertura i tancament de la fàbrica hi pot haver consum de la xarxa.

Es conclou que l'estalvi no és suficient com per aplicar un canvi en l'horari ja que si es considera l'aplicació dels peatges per autoconsum l'estalvi es reduiria pel peatge per l'energia autoconsumida en períodes cars. A més, s'hauria de modificar el conveni dels treballadors i se'ls hi hauria de pagar un complement salarial per nocturnitat.

10. Pressupost

L'aplicació dels plans de millora de la gestió energètica que es presenten en aquest treball s'anomenen dins el sector energètic com una millora sense inversió, ja que no requereix d'una inversió en equipament.

En el pressupost que es presenta en aquest apartat s'inclouen les despeses d'enginyeria per l'elaboració d'aquest document. Aquestes despeses comprenen les hores de visita a la fàbrica i les oficines de l'empresa, les hores de recerca i anàlisi d'informació, les hores de modelització i les hores de redacció.

Com a total d'hores d'enginyeria es pren la màxima dedicació que li correspon per normativa acadèmica, és a dir, 30 hores/crèdit ECTS. Tenint en compte que aquest treball són 12 crèdits ECTS, el total d'hores d'enginyeria suma 360.

A la Taula 10.1 es presenta el pressupost desglossat per hores.

Taula 10.1. Pressupost.

Concepte	Preu unitari	Unitats	Total
Visites	40 €/h	20 h	800,00 €
Hores recerca i anàlisi d'informació	40 €/h	120 h	4.800,00 €
Hores modelització	40 €/h	120 h	4.800,00 €
Hores redacció	40 €/h	100 h	4.000,00 €
Base imposable			14.400,00 €
IVA (21 %)			3.024,00 €
Total			17.424,00 €

El preu unitari inclou despeses de desplaçament i despeses en suport informàtic.

El pressupost total d'elaboració d'aquest estudi presentat en aquest document ascendeix a disset mil quatre-cents vint-i-quatre euros.

11. Impacte ambiental

En aquest capítol s'estudia l'impacte mediambiental per l'aplicació del nou pla de generació òptim que s'ha trobat. Així doncs, bàsicament es contemplarien emissions produïdes per la combustió del gas natural. Queda fora de l'abast d'aquest estudi, els residus i soroll produïts per l'activitat de la planta. L'impacte acústic del motor de gas tampoc es considera ja que la potència acústica es manté en valors semblants independentment dels valors càrrega en què opera el motor.

A la Taula 11.1 es recull la concentració dels contaminants en el focus emissors de la cogeneració. Aquests valors de concentració de contaminants es produeixen per la combustió del gas natural amb el motor al 95 % de càrrega. Les dades de la taula s'han extret de l'informe d'inspecció d'emissions a l'atmosfera de l'any 2016 que es va realitzar a la planta de Bujaraloz.

Taula 11.1. Concentració de contaminants per la combustió del gas natural en el motor de cogeneració.

Contaminants	Tipus contaminant	Concentració	Màxim normatiu
CO ₂	Global	9,8 % vol.	-
CO	Local	83,4 ppm	300 ppm
NO _x	Local	78,1 ppm	500 ppm

Les emissions de contaminants locals compleixen amb escreix amb la normativa del territori. A més, l'augment de càrrega del motor en el pla d'operació òptim seria positiu per la reducció d'aquestes emissions. Això es degut a què la generació de NO_x disminueix amb la reducció de temperatura i, com s'ha vist a l'apartat 6, la temperatura és més baixa a càrregues altes. La combustió també és més bona a càrregues altes i el monòxid de carboni produït disminuiria.

Per tal de realitzar una comparativa amb les emissions per la compra d'electricitat de la xarxa únicament es pren les emissions dels contaminants globals, és a dir, del diòxid de carboni.

En primer lloc, es considera el pitjor cas en què no hi ha nous aprofitament tèrmics malgrat l'augment de generació i, per tant, l'augment d'energia tèrmica disponible. En aquest cas, es troba que hi ha un increment d'emissions d'un 3,4% respecte el pla de generació real efectuat el 2016 (veure Taula 11.2).

Per realitzar la Taula 11.2 s'ha considerat l'energia venuda com un estalvi d'emissions dels generadors de la xarxa, per això, és un valor negatiu. Tant per calcular aquest estalvi com les emissions per l'energia comprada s'ha pres un valor de 0,308 kg CO₂/kWh elèctric que correspon a les emissions del mix de la xarxa elèctrica peninsular per l'any 2016 [8]. Per calcular les emissions procedents del consum de gas s'ha pres un valor de 0,202 kg

CO₂/kWh combustible segons el valor de factor d'emissió de les factures de gas.

Taula 11.2. Resum de les emissions de diòxid de carboni.

Fonts d'emissió	Optimització	Dades reals
Energia venuda [kg CO ₂]	-2.302.362	-1.638.973
Energia comprada [kg CO ₂]	185.921	174.221
Motor [kg CO ₂]	6.244.906	5.416.630
Caldera vapor fàbrica [kg CO ₂]	432.272	432.272
Deshidratadora [kg CO ₂]	628.403	628.403
Total [kg CO ₂]	5.189	5.013
Augment d'emissions	3,40%	

Com es pot observar a la Taula 11.2 les emissions de la caldera de vapor de la fàbrica i la deshidratadora són iguals tant en la optimització com en les dades reals ja que no es considera nous aprofitaments tèrmics. No obstant, si es té en compte l'exposat en l'apartat 6.3.1 podria haver nous aprofitaments. Per això, en la Taula 11.3 es presenta un nou cas considerant que hi ha la mateixa relació d'aprofitaments tèrmics per l'increment de generació. Això es tradueix en una reducció d'emissions de la deshidratadora i la caldera de vapor de la fàbrica.

Taula 11.3. Resum de les emissions de diòxid de carboni considerant nous aprofitaments tèrmics.

Fonts d'emissió	Optimització	Dades reals
Energia venuda [kg CO ₂]	-2.302.362	-1.638.973
Energia comprada [kg CO ₂]	185.921	174.221
Motor [kg CO ₂]	6.244.906	5.416.630
Caldera vapor fàbrica [kg CO ₂]	331.051	432.272
Deshidratadora [kg CO ₂]	575.488	628.403
Total [t CO ₂]	5.035	5.013
Augment d'emissions	0,45%	

D'acord amb la Taula 11.3 es pot concloure que sempre que hi hagi uns aprofitaments de la generació tèrmica proporcionals a l'actual, les emissions de diòxid de carboni es mantindran pràcticament igual. No obstant, es detecta que hi ha un petit augment ja que les emissions de la xarxa són més baixes que les que correspondrien a la cogeneració degut a la penetració de renovables. Aplicant el rendiment elèctric equivalent de la planta, aproximat al 60% sobre el valor del factor d'emissió del combustible s'obté 0,337 kg CO₂/kWh elèctric produït per la cogeneració. Aquest valor de factor d'emissió és superior als 0,308 kg CO₂/kWh elèctric de la xarxa.

Encara que pugui semblar que l'operació d'aquesta cogeneració no sigui mediambientalment bona amb les dades presentades, cal considerar que és una solució

eficient per donar resposta a les necessitats de la planta i evitar una ampliació de la xarxa elèctrica. El combustible gas és el més idoni degut al seu baix factor d'emissions de diòxid de carboni i la seva facilitat de transport. Degut a què s'ha de satisfer un consum tèrmic important, l'única opció renovable seria la biomassa però, per la falta de disponibilitat en l'entorn, tampoc es pot considerar viable.

Tal com s'ha exposat en l'apartat 6.3.1, una proposta per augmentar el rendiment elèctric equivalent seria la instal·lació de dipòsits d'inèrcia per emmagatzemar l'excedent tèrmic de l'aigua calenta i reduir consum elèctric de la xarxa per escalfar grasses en hores nocturnes mitjançant resistències elèctriques. Això suposaria un estalvi en les emissions de CO_2 per la compra d'uns 30.000 kWh energia elèctrica de la xarxa.

Conclusions

Al llarg dels anys s'han anat aplicant mesures per millorar els aprofitaments tèrmics i augmentar el rendiment global de la planta de cogeneració de la fàbrica de Bujaraloz. No obstant, això ha fet que el sistema guanyés complexitat i li mancava un estudi per veure si realment el pla d'operació era òptim.

El 2016 es va operar la planta de manera que la generació s'adaptava per tal d'arribar a una consigna d'exportació de 1.500 kWhe. El valor de 1.500 kWhe és un valor mig al que es podia arribar adaptant la generació tant si la planta operava a plena càrrega com a baixa càrrega. Així doncs, aquesta consigna permetia no desviar-se gaire del pla de venda d'energia que es passava a la comercialitzadora elèctrica. No és molt convenient que hi hagin desviacions ja que, en funció de si s'actua a favor o en contra del sistema, es pot aplicar penalitzacions.

En aquest projecte no s'ha tingut en compte la desviació en la consigna d'exportació ja que no és possible predir el seu cost amb antelació. No obstant, s'ha pogut constatar que és econòmicament favorable portar la generació al màxim tant si s'apliquen com no el peatges per autoconsum en un futur. D'aquesta manera, s'observa una diferència significativa entre el pla d'operació real i l'òptim. Aquesta diferència es deguda principalment a què en el cas real, en hores de baix consum de la fàbrica, el motor es portava a baixa càrrega per complir amb la consigna. El total d'estalvi, en cas de poder aplicar l'òptim sense considerar el cost de l'autoconsum, ascendiria a aproximadament 75.000€, una xifra que no és menyspreable. En aquesta xifra també hi ha inclòs l'estalvi per ajustar les potències contractades, que representa un 20% de l'estalvi total. Amb l'ajustament de potències s'aconsegueix reduir el cost del pagament regulat per accés de tercers a la xarxa.

Respecte l'aplicació dels càrrecs per autoconsum, cal considerar que la despesa energètica augmenta considerablement (150.000€ de diferència) pel que, encara que no s'apliquin fins al 2020, cal tenir-ho en compte i fer-ne un anàlisis precís. Es considera que són uns càrrecs injustos ja que, tot i no tenir capacitat de xarxa suficient per abastir-se d'aquesta, es pretén cobrar com si hi hagués aquest servei. Atès que fins al 2020 no es preveu que s'apliquin a la cogeneració és possible que es contemplin aquestes excepcionalitats en posteriors reformes del text legal.

En relació a l'horari de funcionament de la fàbrica, es conclou que l'actual de 6h a 24h és suficientment bo i no compensaria canviar-lo.

Finalment, pel que fa a l'eficiència de la planta, s'ha detectat que un augment de generació sense un augment dels aprofitaments tèrmics pot fer baixar el rendiment global i empitjorar l'impacte ambiental. No obstant això, es conclou que en el cas d'estudi s'aprofitaria l'increment d'energia tèrmica disponible ja que hi ha suficient demanda. En primer lloc, hi ha moments en què funciona la generació de vapor de la fàbrica en paral·lel amb la caldera de

vapor de la cogeneració perquè hi ha una manca d'energia tèrmica disponible de la cogeneració. També s'ha de cremar més combustible per proporcionar l'energia tèrmica necessària per a la deshidratació de farratges.

Amb aquestes conclusions, a continuació s'enumeren varies recomanacions per tal d'aplicar el pla òptim de generació i millorar l'eficiència de la planta.

En primer lloc, es recomana aprofitar les càrregues desplaçables (molins, empastilladora i també la deshidratadora) que permetrien configurar un pla de venda d'energia amb poques desviacions. Ampliant la capacitat d'emmagatzematge en sitges es podria planificar el funcionament dels molins i la empastilladora en aquells moments en què hi hagués poc consum de les línies de la fàbrica. D'aquesta manera es tindria un stock i no caldria posar en funcionament aquestes màquines en hores amb un consum elevat de les línies de producció de pinso. En altres paraules, es suavitzaria la corba de la demanda i hi hauria un consum més constant al llarg del dia.

Si es programes el funcionament de la deshidratadora també hi hauria un augment d'eficiència en els aprofitaments de gasos. Quan hi ha un major consum elèctric de les línies de producció de pinso la demanda de vapor és més elevada i, havent la deshidratadora parada, es podria aprofitar tota l'energia del gasos per generar vapor. Per contra quan les línies estiguessin a baixa càrrega, els gasos s'aprofitarien per la deshidratadora.

La consigna d'exportació d'electricitat hauria de ser diferent en funció de l'època de l'any. Per exemple, en els mesos en què la deshidratadora pot funcionar tot el dia, la consigna d'exportació haurà de ser menor. També s'hauria d'estudiar augmentar la consigna d'exportació per les tardes ja que acostuma a haver menor consum elèctric. Aquest estudi s'hauria d'efectuar després d'un anàlisi de l'operació òptima de les càrregues desplaçables.

Pel que fa a les potències a contractar, els valors òptims calculats estan molt ajustats i s'hauria d'aplicar un marge de seguretat. Per evitar un ajust massa fi de les potències a contractar, es considera oportú revisar les dades disponibles dels anys anteriors i del 2017.

Per acabar, com a mesura addicional per augmentar l'eficiència de la planta es planteja incorporar dipòsits d'inèrcia per aprofitar l'excedent d'aigua calenta a 85°C pels consums nocturns d'escalfament de grasses i de la planta de gasificació. D'aquesta manera també s'obtingria un estalvi econòmic per la compra d'energia, el qual compensaria amb la inversió de l'acumulador d'inèrcia.

Agraïments

En primer lloc vull agrair a Pol Olivella, director del treball, per totes les recomanacions rebudes i la motivació que m'ha transmès per aquest projecte.

En segon lloc, dono les gràcies a tots els treballadors de Corporación Alimentaria Guissona que han col·laborat per tal de facilitar-me la informació necessària per poder desenvolupar aquest treball. Entre d'altres, vull destacar a Albert Jové i Miguel Martínez per la informació donada en les visites a fàbrica, a Ramon Vendrell per la recerca de documentació interna de la planta de Bujaraloz i a Raul Pacheco per la informació relativa a les condicions econòmiques de compra i venda d'electricitat. També vull agrair a Josep Ribó, cap del departament d'alimentació animal i producció de pinsos, per donar el seu vist-i-plau perquè pogués realitzar aquest projecte.

Finalment, vull dedicar un agraïment especial al meu pare, també treballador de Corporación Alimentaria Guissona, per tot el seu temps dedicat a facilitar-me recursos, contactes i resoldre'm dubtes que em sorgien en el transcurs de la realització d'aquest treball.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] AGROVECO. *Taco único* [fotografia en línia]. [Consulta: 13 abril 2017]. Disponible a: <http://www.agrovec.com/blog/product-details/taco-unico/>.
- [2] Energía y Sociedad. *Secuencia de mercados en el mercado ibérico de electricidad (MIBEL)* [il·lustració en línia]. [Consulta: 20 juliol 2017]. Disponible a: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/6-1-formacion-de-precios-en-el-mercado-mayorista-diario-de-electricidad/>.
- [3] OMIE, Operador del Mercado Ibérico de la Electricidad. *Secuencia de tiempo de los mercados y procesos del MIBEL* [il·lustració en línia]. [Consulta: 20 juliol 2017]. Disponible a: <http://www.omie.es/inicio/mercados-y-productos/mercado-electricidad/nuestros-mercados-de-electricidad/diario-e-intradia>.
- [4] *Tarifas de Acceso de Electricidad (Alta Tensión)* [en línia]. 2015. [Consulta 2 juliol 2017]. Disponible a: <http://mifacturadeluz.com/tarifas-de-acceso-de-electricidad-alta-tension/>.
- [5] Dólera, L. *Análisis del RD 900/2015 de autoconsumo* [en línia]. Madrid: UNEF, 2015. [Consulta: 15 maig 2017]. Disponible a: http://www.f2e.es/uploads/doc/20151204091955.01_unef_autoconsumo_in_out.pdf.
- [6] ESIOS, Sistema de Información del Operador del Sistema. *Aplicación de análisis de datos* [aplicació web]. [Consulta 4 juny 2017]. Disponible a: https://www.esios.ree.es/es/analisis/600?vis=1&start_date=01-01-2016T00%3A00&end_date=31-12-2016T23%3A00&compare_start_date=31-12-2015T00%3A00&groupby=hour&geoids=3.
- [7] LAPESA. *Tarifa precios depósitos* [en línia]. 2015. Disponible a: <http://fycal.net/pdf/lapesa.pdf>.
- [8] OFCC, Oficina Catalana del Canvi Climàtic. *Nota informativa sobre la metodologia d'estimació del mix elèctric* [en línia]. Barcelona: 2017. Disponible a: http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduceix_emissions/factors_emissio_associats_energia/170224_Nota-metodologica-mix_cat.pdf.

Bibliografia complementària

- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. *Guía de la cogeneración* [en línia]. Madrid: 2010. [Consulta: 28 març 2017]. Disponible a: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Cogeneracion-fenercom-2010.pdf>.

- Thomas, P. *Optimization in Julia* [vídeo en línia]. 2016. [Consulta: 1 juny 2017]. Disponible a: <<https://essays.philipithomas.com/video-optimization-in-julia-7266000856fa>>.
- JuliaOpt. *Optimization packages for the Julia Language* [pàgina web]. [Consulta: 1 juny 2017]. Disponible a: <<http://www.juliaopt.org/>>.
- REE, Red Eléctrica Española. *Glosario*. [Consulta 15 juny 2017]. Disponible a: <<http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/glosario>>.
- The Julia Language. *Manual* [en línia]. Versió estable. [Consulta 28 juny 2017]. Disponible a: <<https://docs.julialang.org/en/stable/search/?q=julia>>.
- OMIE, Operador del Mercado Ibérico de la Electricidad. *Nuestros mercados de electricidad* [en línia]. [Consulta: 20 juliol 2017]. Disponible a: <<http://www.omie.es/inicio/mercados-y-productos/mercado-electricidad/nuestros-mercados-de-electricidad/diario-e-intradia>>.